

**Variación en el diseño hidráulico de alcantarillado pluvial en la ciudad de Barranquilla,
bajo diferentes escenarios hidrológicos**

Por:

Jalil Mofid Janna Pérez



Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería civil y Ambiental

Barranquilla

2020

**Variación en el diseño hidráulico de alcantarillado pluvial en la ciudad de Barranquilla,
bajo diferentes escenarios hidrológicos**

Por:

Jalil Mofid Janna Pérez

Tutor: Ing. Cesar Cardona, PhD.

Co - tutor: Ing. Gabriel Torres

Para otorgar el título de Ingeniero Civil

Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil y Ambiental

Barranquilla

2020

Nota de aprobación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, Colombia

Dedicatoria

A Dios y a mi familia, sin su apoyo incondicional y sus enseñanzas no hubiese sido posible nada de esto. También se lo dedico a las generaciones venideras de mi familia con el fin de demostrarle que con empeño y dedicación los sueños pueden hacerse realidad.

Dedicaré mi vida académica y profesional al desarrollo sostenible. Centrándome y especializándome en el cuidado, optimización y gestión adecuada del recurso primordial universal: el agua.

Agradecimientos

Primero que todo le doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este punto. Por darme la oportunidad de estudiar esta maravillosa carrera en una universidad tan prestigiosa, por haberme premiado con un tesoro de familia que me brindó todas las herramientas necesarias para poder llegar a cumplir tan anhelada meta.

A mi madre Edith Teresa Pérez Cañas, siempre con su gran amor, actitud luchadora, visionaria, con esa mente tan brillante y bondadosa. Nunca faltó una palabra de aliento en el momento indicado para ayudarme a seguir adelante en el camino hacia este título universitario.

A mi padre Jalil Antonio Janna Rengifo, que a pesar de todas las adversidades me enseñó que uno debe cumplir con su deber, que no hay excusa válida para justificar un fracaso y que la familia siempre debe ser lo más importante en nuestras vidas.

A mi hermana mayor Oriana Jubet Janna Pérez, a esta gran mujer le agradezco por haberme mostrado el camino, que ser profesional era posible y que las palabras no valen nada si no se acompañan de acciones que las sustenten.

A mi amada y gran amiga Daniela Gómez Galeano que me ayudo de muchísimas formas en este camino, pero en especial le agradezco mucho por tenerme paciencia en mis momentos más oscuros, por enseñarme que la excelencia y la pasión van de la mano, por siempre creer en mí.

A mi tío el Ingeniero Héctor Pérez Cañas, que me presentó en un momento de confusión, cuando no sabía si seguir estudiando esta carrera, porque no la conocía, lo que es ser un

Ingeniero Civil y me brindo sus conocimientos. Los cuales fueron los pilares que me permitieron edificar el resto de mi carrera y este proyecto de grado.

A mi tío Jorge Pérez, por enseñarme que soy ciudadano del mundo y para el mundo.

A mis asesores el Ingeniero Cesar Cardona y el Ingeniero Gabriel Torres, por su tiempo, conocimiento, paciencia y motivación.

A todos ellos y muchas personas más que serían redundante expresar, infinitas gracias.

Resumen

Evaluar la variación de los diseños hidráulicos de un canal urbano, a partir de curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para el análisis hidrológico, es susceptible de optimización si se adicionan modelos ponderados geolocalizados y métodos de estimación de incertidumbre. En el presente trabajo se analiza el arroyo de Rebolo en la ciudad de Barranquilla, Colombia. Para ello se establecen escenarios de referencia por el método de estimación de curvas IDF del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con insumos de la estación Ernesto Cortissoz y Las Flores. Además de considerar un escenario de contraste con base en el modelo de Mejía (2017). La simulación hidrológica se realiza con el programa HEC-HMS utilizando el método SCS. Para la simulación hidráulica se utiliza HCANALES y HEC-RAS. Como resultado, se sustenta la variación de diseño hidráulico y los efectos en sus costos. Siendo el escenario de los datos de la estación Ernesto Cortissoz la que presenta menor variabilidad e incertidumbre. Se concluye que el modelo de Mejía (2017) es una herramienta útil para optimizar el cálculo del análisis hidrológico y el diseño hidráulico. Para la estimación de la incertidumbre y aplicación del método GLUE, es necesario datos medidos de caudales.

Palabras clave: Variación, incertidumbre, hidrología, hidráulica, arroyo, Rebolo, escenario

Abstract

Evaluating the variation of the hydraulic designs of an urban canal, from intensity, duration and frequency curves (IDF) for hydrological analysis, is susceptible of optimization if geolocated weighted models and uncertainty estimation methods are added. In the present work, the Rebolo stream in the city of Barranquilla, Colombia is analyzed. For this, reference scenarios are carried out using the IDF curve estimation method of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), with inputs from the Ernesto Cortissoz and Las Flores stations. In addition to considering a contrast scenario based on the Mejía (2017) model. The hydrological simulation is carried out with the HEC-HMS program using the SCS method. For the hydraulic simulation, HCANALES and HEC-RAS are used. As a result, the hydraulic design variation and cost differences were found. The data scenario from the Ernesto Cortissoz station being the one with the least variability and uncertainty. It is concluded that the Mejía (2017) model is a useful tool to optimize the calculation of hydrological analysis and hydraulic design. To estimate the uncertainty and apply the GLUE method, it is necessary to measure flow data.

Keywords: Variation, uncertainty, hydrology, hydraulics, stream, Rebolo, stage

Tabla de Contenido

Lista de tablas y figuras	11
Introducción	14
1. El alcantarillado pluvial de Barranquilla ante diferentes escenarios hidrológicos de diseño	15
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Justificación.....	16
1.3. Objetivos	17
2. Marco teórico.....	18
2.1. Modelo de Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF)	18
2.2. Modelo IDF ponderado y georreferenciado de Mejía.....	21
2.3. Modelo de estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada (GLUE).....	23
3. Diseño metodológico	26
3.1. Preparación de datos e información	26
3.2. Simulaciones	27
3.3. Análisis Comparativo entre los resultados de los distintos escenarios.	29
4. Datos e información.....	30
4.1. Análisis de contexto	30
4.2. El plan estratégico para la solución de drenaje urbano en el Distrito de Barranquilla.	34
4.3. Datos cuenca de Rebolo	46
5. Escenario de contraste con modelo Mejía	56
5.1. Función IDF de modelo Mejía	59
5.2. Estimación de parámetros	60
6. Simulaciones hidrológicas e hidráulicas.....	68
6.1. Simulación hidrológica	68

6.2 Simulación hidráulica.....	82
7. Análisis comparativo	90
7.1. Análisis comparativo de parámetros sensibles.....	90
7.2. Efectos de la variabilidad en los costos.....	93
Conclusiones	97
Referencias.....	99

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1 Datos de estaciones meteorológicas.	37
Tabla 2 Estación pluviométrica y precipitaciones máximas diarias (mm)..	38
Tabla 3 Cuenca, subcuencas, áreas y coeficiente de reducción de área..	38
Tabla 4 Precipitaciones según periodo de retorno.	39
Tabla 5 Parámetros para usar para la modelación hidrológica y obtención de caudal por medio del HEC-HMS.....	41
Tabla 6 Cálculo de caudales por cuenca y subcuencas por periodo de retornos..	42
Tabla 7 Periodos de retorno de diseño según el RAS 2000.....	43
Tabla 8 Caudal de cuenca y subcuenta a un periodo de retorno de 10 años.....	47
Tabla 9 Área y caudales de microcuencas	53
Tabla 10 Resultado de dimensionamiento hidráulico.....	54
Tabla 11 Coordenadas del punto centroide de la cuenca Rebolo..	58
Tabla 12 Características morfométricas de la cuenca Rebolo, Qgis.....	59
Tabla 13 Parámetros de la cuenca Rebolo para aplicar método de Mejía 2017.	65
Tabla 14 Intensidad, duración y frecuencia para la cuenca Rebolo con el método de Mejía (2017).....	66
Tabla 15 Características morfométricas de la cuenca Rebolo..	71
Tabla 16 Tiempo de concentración de la cuenca Rebolo..	71
Tabla 17 Tiempo de concentración y coeficientes de reducción.	72
Tabla 18 Pluviograma.	72
Tabla 19 Parámetros fijos para simulación hidrológica.....	74
Tabla 20 Resumen de resultados de simulaciones hidrológicas..	81
Tabla 21 Resumen de resultado de simulaciones hidráulicas.	89
Tabla 22 Resumen de análisis comparativo y efectos de la variación en los costos.	95
Tabla 23 Resultados e intervalos de confianza..	96

Figuras

Figura 1 Marco teórico.....	18
Figura 2 Curvas IDF.	20
Figura 3 Ubicación de la zona en estudio..	31

Figura 4 Esquema general de cuencas de arroyos en Barranquilla.....	36
Figura 5 Bloque alterno a periodo de retorno de 10 años.	40
Figura 6 Hidrograma de salida del HEC-HMS.....	41
Figura 7 Estado de la cuenca antes de la intervención.....	48
Figura 8 Periodo de retorno de diseño para tramos canalizados.....	49
Figura 9 Delimitación de microcuencas..	52
Figura 10 Red de drenaje de la cuenca de Rebolo.	55
Figura 11 Ubicación y delimitación de la cuenca Rebolo..	57
Figura 12 Centroide de la cuenca Rebolo.	58
Figura 13 Parámetro a.....	60
Figura 14 Parámetro b.	61
Figura 15 Parámetro c.....	62
Figura 16 Parámetro d.....	63
Figura 17 Parámetro de precipitación máxima diaria.	64
Figura 18 Curvas IDF con método de Mejía 2017 para cuenca Rebolo.	67
Figura 19 Hietogramas adimensionales de diseño.....	73
Figura 20 Resultados hidrológicos con estación pluviométrica según Mejía 2017.....	75
Figura 21 Resultados hidrológicos con estación pluviométrica Las Flores.....	77
Figura 22 Resultados hidrológicos con estación del aeropuerto Ernesto Cortissoz.	78
Figura 23 Resultados hidrológicos con bloque alternos del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del Distrito de Barranquilla usados en HEC-HMS (Replica).	79
Figura 24 Resultados con caudal tomado de los resultados presentados en el plan estratégico para la solución de drenaje urbano del Distrito de Barranquilla.....	80
Figura 25 Resultados hidráulicos con modelo Mejía 2017.....	83
Figura 26 Resultados hidráulicos con estación Las Flores..	85
Figura 27 Resultados hidráulicos con estación Ernesto Cortissoz.	86
Figura 28 Resultados hidráulicos con intento de réplica de caudal del Plan Estratégico de drenaje de la ciudad de Barranquilla.	87
Figura 29 Resultados hidráulicos con caudal del plan estratégico de drenaje de la ciudad de Barranquilla.....	88
Figura 30 Diagrama de caja de precipitación total (mm).	91

Figura 31 Diagrama de caja de tirante normal.....	91
Figura 32 Diagrama de caja de caudal.....	92

Introducción

El Distrito de Barranquilla presenta problemas de drenaje pluvial que generan impactos económicos, sociales, ambientales, de infraestructura y movilidad. Efectos que desafían diseño, construcción, operación y mantenimiento de obras hidráulicas, al momento de la selección de datos incidentes en los modelos hidrológicos determinantes de sistemas hidráulicos.

En esta investigación aplicada, se verá cómo se cuantifican variaciones en el diseño hidráulico del alcantarillado pluvial en la ciudad de Barranquilla para el arroyo Rebolo, bajo diferentes escenarios hidrológicos de diseño. Con el fin de demostrar que incluso en una misma ciudad los cálculos y diseños de soluciones para este tipo de proyectos no solo deben basarse en la cercanía de la estación pluviométrica, sino también, a la ubicación georreferenciada del centroide de la cuenca en estudio. Tradicionalmente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son la práctica común para modelar los procesos de lluvia- escorrentía, que fundamentan la cuantificación de caudales picos para diseñar obras hidráulicas que drenan arroyos. Al permitir calcular intensidades en distintos periodos de retorno y tiempo de concentración. Las curvas IDF estructuradas a partir de los registros de precipitación de estaciones pluviográficas son escasas, complementadas con datos de estaciones pluviométricas a través de ajustes de ecuaciones locales de regresión. Por lo que, la intención de la investigación es demostrar la variación y comparar con el uso del modelo desarrollado por Mejía (2017). En primera instancia se explica el planteamiento del problema, justificación, objetivos, marco teórico y el diseño metodológico. En la segunda, se presenta la recolección, tratamiento de datos, información, desarrollo de modelaciones, simulaciones y análisis comparativo. Por último, presentación de resultados y conclusiones.

1. El alcantarillado pluvial de Barranquilla ante diferentes escenarios hidrológicos de diseño

Se presenta en este capítulo el planteamiento del problema, la formulación de pregunta, la justificación, el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación desarrollada.

1.1. Planteamiento del problema

Los problemas que generan los arroyos en temporadas de lluvias intensas en varios sectores de la ciudad de Barranquilla, Departamento del Atlántico, Colombia; revisten una importancia social por los altos costos económicos, sociales y medioambientales que generan.

Adicionalmente, los arroyos constituyen un reto para los académicos y profesionales. Encargados de encontrar soluciones óptimas a las problemáticas de drenaje. En este proceso, se encuentran la elección del escenario hidrológico de diseño.

Cuando se realizan diseños de obras civiles de cualquier tipo, se tienen en cuenta múltiples variables, cada una con una importancia específica dentro del proyecto. Para reducir el porcentaje de errores, los datos de entrada seleccionados, para el cálculo y posterior análisis de los diseños, son generalmente los más críticos para disminuir costos y aumentar beneficios que prolongan la vida útil de los proyectos.

Dentro de los datos utilizados para realizar obras hidráulicas, la información pluviográfica y pluviométrica tiene gran importancia para los diseños finales. Por lo que, para el cálculo hidráulico, las variaciones hidrológicas pueden generar distintos tipos de diseños.

1.1.1. Pregunta de investigación.

¿Cuál es la variación y sus efectos en el diseño del alcantarillado pluvial del arroyo de Rebolo ante diferentes escenarios hidrológicos de diseño?

1.2. Justificación

La importancia de los datos pluviométricos en el análisis hidrológicos es indispensables para los diseños hidráulicos, lo que, implica una elección cuidadosa de las estaciones que proporcionan los datos de lluvias y escorrentías. Ya que constituye una decisión que puede generar efectos en resultados diferentes en los costos, funcionabilidad y durabilidad de los diseños finales.

En la construcción y operación de obras de carácter hidráulico, como la canalización de arroyos en Barranquilla, para la elaboración de diseños, previamente se definen áreas de aferencia hidrológica, según la ubicación geográfica.

Conocida el área aferente, se elige la estación que aporta la información pluviométrica.

En consecuencia, conocer los efectos de tomar diferentes estaciones y de entender de manera general la incertidumbre asociada, se traduce en cambios considerables del costo de los proyectos y/o sostenibilidad.

Determinar qué tanto influyen las estaciones pluviométricas para el diseño final de obras hidráulicas, en este caso el arroyo de Rebolo en la ciudad de Barranquilla, aporta perspectivas de parametros incidentes en el cálculo del diseño y operación de obras de infraestructura orientadas a mitigar los altos impactos sociales, económicos y ambientales que generan en los habitantes: proporcionando confianza y seguridad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar la variación y la incertidumbre de los diseños hidráulicos de un canal urbano en la ciudad de Barranquilla, a partir de diferentes conjuntos de datos pluviométricos de base para el análisis hidrológico.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Desarrollar el análisis y modelación hidrológica con diferentes conjuntos de datos para el canal urbano seleccionado.
2. Adelantar el diseño hidráulico del canal de interés, para diferentes resultados hidrológicos y a partir de modelación hidráulica.
3. Analizar comparativamente las diferentes condiciones hidrológicas a partir de las variables e incertidumbre asociada a los diseños finales del canal.

Por último, la investigación se limita a tomar como universo el sistema de alcantarillado pluvial en la ciudad de Barranquilla, y como muestra la cuenca de Rebolo. Donde la investigación indaga hasta la disponibilidad de datos utilizables.

2. Marco teórico

Se muestra la fundamentación conceptual de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) de lluvias y escorrentías comúnmente aplicables a los diseños de ingeniería hidráulica en el área de la ciudad de Barranquilla.

A partir de los aportes de Vargas, M. R. y Díaz-Granados, D. M. (1998) sobre las curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia, se presentan las contribuciones de la fórmula sintética de ponderación y georreferenciación de Mejía (2017).

Por último, se expone el modelo de estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada GLUE (por sus siglas en inglés) propuesto por Keith Beven y Andrew Binley (1992).

Con el fin de resumir el contenido del marco teórico se presenta un resumen en la *Figura 1*



Figura 1 Marco teórico. Fuente: propia del autor.

2.1. Modelo de Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF)

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes a una misma frecuencia o período de retorno. (Témez, 1978).

Las curvas IDF son utilizadas principalmente para determinar la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en lugares donde no se poseen pluviógrafos. Habitualmente son usadas en el cálculo de diseños para el dimensionamiento de obras hidráulicas, también son utilizadas en la modelación hidrológica de cuencas para la evaluación del riesgo de inundaciones.

Las curvas IDF representan la intensidad (I) o magnitud de una lluvia expresada en milímetros por hora, para una duración (D) determinada que usualmente puede ser 30, 60, 90, 120 o 360 minutos y que se estima tiene una probabilidad de ocurrencia, o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como periodo de retorno.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del Ministerio del Ambiente de Colombia, dispone de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF) para las estaciones que cuentan con esta información. En 2016 el IDEAM actualizó las curvas IDF para 110 estaciones empleando la información disponible hasta 2010. Para mayor detalle de la información suministrada por el IDEAM, se muestra en la *Figura 2*

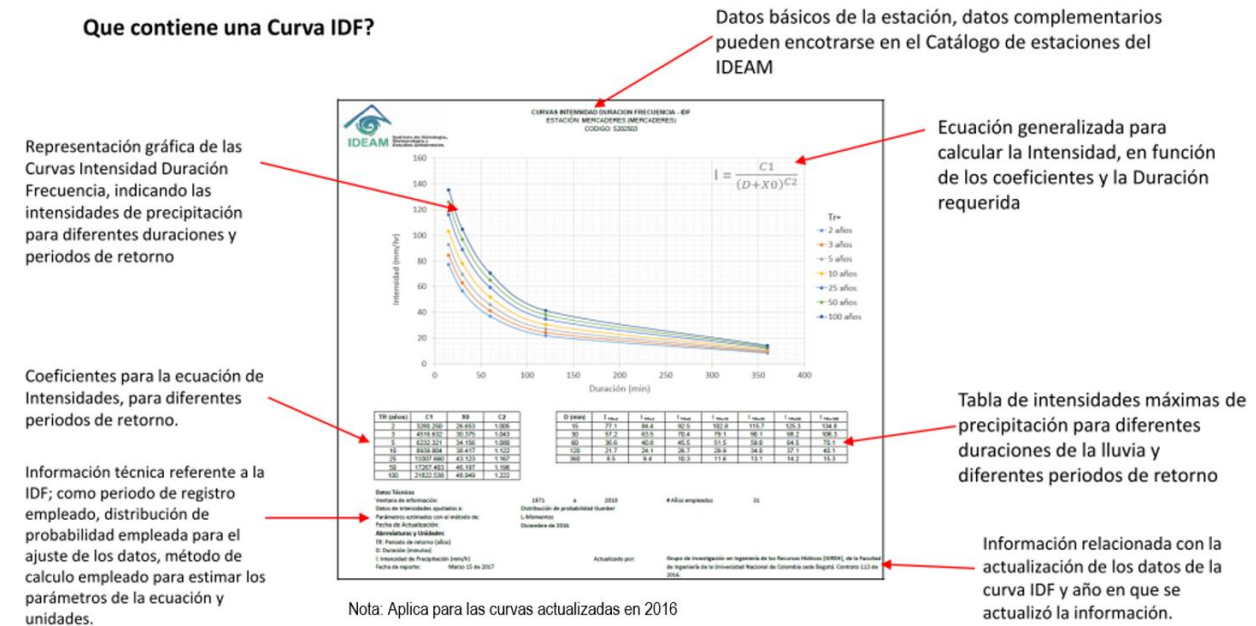


Figura 2 Curvas IDF. Fuente: IDEAM

Por otra parte, además, basado en el estudio realizado por Vargas y Díaz Granados (1998) el Manual de Drenaje para Carreteras del Instituto Nacional de Vías-INVIA (2009) propone para Colombia un método simplificado para determinar curvas IDF cuando no se disponen registros de precipitación de corta duración.

El estudio divide el territorio colombiano en cinco regiones climatológicas equivalentes a las regiones geográficas con el fin de ajustar ecuaciones para la estimación de curvas IDF en función de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación referenciada.

La caracterización de la relación intensidad, duración y frecuencia de series de precipitaciones para Colombia planteadas por Vargas y Díaz Granados (1998) propusieron una ecuación de intensidad en función de la precipitación máxima promedio en 24 horas. La expresión matemática se muestra en la siguiente ecuación:

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{t^c}$$

Donde i : Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T : Periodo de retorno, en años.

M : Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual.

t : Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d : Parámetros de ajuste de la regresión.

2.2. Modelo IDF ponderado y georreferenciado de Mejía

El modelo de Mejía (2017, p. 60) propone la construcción de curvas IDF sintéticas a partir de precipitación máxima en 24 horas.

La autora ajustó para el Departamento del Atlántico, la ecuación para Colombia a las curvas IDF reales construidas en cada estación pluviométrica, con parametrización de la ecuación de intensidad.

En el proceso de parametrización, primero transformó la ecuación de tipo exponencial a una ecuación de tipo lineal aplicando el logaritmo natural a ambos lados de la igualdad. (Mejía, 2017, p. 60).

Expresión matemática de la ecuación de partida:

$$\ln I = \ln A - c \ln (t)$$

Donde

$$\ln A = \ln k + b \ln (T)$$

Donde

$$\ln k = \ln a + d \ln M$$

La propuesta permite establecer una relación lineal entre los logaritmos de las variables, donde aplicó la técnica de mínimos cuadrados para determinar los valores óptimos de cada parámetro. (Mejía, 2017, p. 61)

Para la aplicación de técnicas geoestadísticas de interpolación Mejía (2017) evaluó el uso de dos técnicas de interpolación, *Inverse Distance Weighting* (IDW) y *Kriging Ordinario* (KO). Con la finalidad de estimar la distribución espacial de los parámetros ajustados a , b , c y d de la ecuación para Colombia de la media anual de la precipitación máxima en 24 horas presentado en las 38 estaciones pluviométricas estudiadas por Mejía (2017, p. 72).

Expresión de la fórmula sintética:

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{t^c}$$

Uno de los aportes del trabajo de Mejía (2017) ha sido la generación de mapas de isolíneas de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas y de los parámetros a , b , c y d del modelo general de intensidad, para el cálculo de intensidades máximas de precipitación en cualquier punto del Departamento del Atlántico. Mediante las superficies de interpolación

obtenidas con el método de Kriging Ordinario (Mejía, 2017, p. 91). Los cuales fueron validados y comparados con el método simplificado propuesto para Colombia por Vargas y Díaz Granados (1998).

2.3. Modelo de estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada (GLUE)

Las cuencas de los arroyos presentan dinámicas de diversos procesos que interactúan en sistemas de lluvia – escorrentía de naturaleza compleja.

Su estudio requiere métodos que permitan cuantificar la incertidumbre en la estructura de datos observados y modelos matemáticos representativos. Ya sea para describir, predecir o comparar capacidades reales de diseños hidráulicos de canalización.

Es una técnica comúnmente aplicada al análisis de sistemas hidrológicos para obtener variación de resultados finales que aportan intervalos de confianza aceptables. (Beven & Binley, 1992)

La metodología propone la estimación de la incertidumbre de modelos distribuidos basados en medidas de probabilidad generalizadas. El procedimiento GLUE funciona con múltiples conjuntos de valores de parámetros. Permite que diferentes conjuntos de valores puedan ser igualmente probables como simuladores de una cuenca. Al considerar limitaciones de una estructura de modelo dada, errores en las condiciones de contexto y observaciones de campo.

El modelo posibilita incorporar diferentes tipos de observaciones en la calibración, en la línea de actualización Bayesiana (David Nott *et al*, 2012) de los valores de probabilidad y la evaluación del valor de las observaciones adicionales al proceso de calibración. (Beven & Binley, 2014)

El método requiere tres pasos para su aplicación, los cuales se presentan a continuación:

Paso 1: se delimitan los modelos, parámetros y variables que se consideran susceptibles de ser determinantes para la simulación del sistema.

En suma, se definen los parámetros a analizar que en este estudio son caudal, tirante normal y precipitación total.

Paso 2: se adelanta simulaciones basadas en los modelos, parámetros y variables definidos en el paso 1. Generalmente se usa el método de Monte Carlo y *Latin Hypercube* method; para generar un rango de posibilidad de resultados para cada conjunto de datos discreto. Monte Carlo es posible realizarlo en una extensión de Excel desarrollada por PALISADE-LTA.COM llamada @RISK. es usado para hacer una muestra aleatoria de los conjuntos de parámetros. No obstante, la aplicación de este método no es limitante para desarrollar el paso 2, ya que el objetivo de este es generar una estimación incondicional de la gestión de datos cuantificados de cualquier variable de estado del sistema.

Paso 3: Se realiza un análisis comparativo. Evaluando para cada simulación realizadas en el paso 2. Por tanto, los conjuntos de parámetros se clasifican según el grado en que se ajustan a los datos observados. Además, la sensibilidad de los parámetros es analizada con respecto a su dispersión y distancia a la media. "Cerca" de los valores observados, se acepta que la simulación tiene una probabilidad dada. $L(\theta | \psi)$, mientras que, si las variables de estado simuladas consideradas no son realistas, la simulación se rechaza por tener probabilidad cero.

Es necesario señalar que cuando las variables de estado simuladas son cercanas a los valores observados. Es factible aceptar que la simulación tiene una probabilidad dada $L(\theta | \psi)$. Mientras que, si las variables de estado simuladas no son realistas, la simulación se rechaza por tener probabilidad cero.

En el tercer paso se estima la incertidumbre dentro de un intervalo de confianza del 95%. De esta manera se asigna un valor de verosimilitud a todos los conjuntos de parámetros aceptados (cero para conjuntos rechazados y positivos para conjuntos aceptados). Con lo que el resultado directo es una representación de verosimilitud de conjunto discreto para todos los modelos, parámetros y variables involucradas. Conjunto que se puede ilustrar en dos (máximo tres dimensiones) y diagramas de dispersión de probabilidad que se utilizan a menudo para ilustrar la estimación de parámetros.

En consecuencia, en el análisis de los parámetros sensibles identificados, se encuentran la precipitación total o curva de masa total, el caudal y el tirante normal. Sobre estos se realiza el análisis de variación e incertidumbre. Para los demás datos del modelo se conservan los valores, es decir, se dejan fijos.

En el proceso de calibración se comparan los datos medidos con los datos simulados, con el fin de estimar la magnitud de la dispersión entre ellos (*equifinality*) (Beven, Keith; Binley, Andrew, 2014) y de esta manera cuantificar una incertidumbre, ya que entre más disperso mayor incertidumbre.

3. Diseño metodológico

Para el desarrollo de la investigación se llevaron a cabo tres (3) etapas metodológicas: preparación de datos e información, simulaciones y análisis comparativo.

3.1. Preparación de datos e información

En esta etapa se recolectan, analizan los datos, la información de contexto y específica de la investigación.

Se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se ejecuta un recorrido de los estudios realizados a lo largo de la historia de Barranquilla hasta llegar al el Plan estratégico.
- A partir del informe del Plan estratégico para la solución del drenaje urbano para el Distrito de Barranquilla se toman datos e información.
- Ubicación de la cuenca hidrográfica influyente en el sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad de Barranquilla, Departamento del Atlántico, Colombia.
- Caracterización hidrológica de la cuenca del arroyo Rebolo como muestra analizar.
- Consulta de las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)
- Captura de los registros.
- Procesamiento de datos.
- Organización de la información.

3.2. Simulaciones

En esta etapa se adelantan las simulaciones hidrológicas e hidráulicas en el diseño de canales en el área de influencia del arroyo de Rebolo en la ciudad de Barranquilla.

Mediante el uso de los modelos, métodos y herramientas de *software* y *hardware*. El proceso de simulación plantea la representación de un modelo del sistema real y llevar a término experiencias con él. Con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema dentro de los límites impuestos en el conjunto de criterios para el funcionamiento del sistema complejo en estudio.

Para esto se ejecutan cuatro simulaciones. Dos de ellas con base a la estación del Ernesto Cortissoz y la estación de Las Flores administradas por el IDEAM. Por otro, lado se adelanta una simulación con el modelo Mejía 2017. Por último, se desarrolla una simulación con los datos obtenidos en el informe del Plan estratégico para la solución del drenaje urbano del Distrito de Barranquilla (2014), con el fin de replicar los resultados encontrados en este.

No obstante, se tienen 5 escenarios, ya que, el quinto son los resultados encontrados en el informe del Plan estratégico.

3.2.1. Simulación hidrológica

La simulación hidrológica para obtener los caudales de diseño para cada escenario se desarrolló con las siguientes actividades:

- Análisis de datos históricos recopilados en curvas IDF suministradas por el IDEAM: factores morfométricos, al CN seleccionado, la duración estimada de la tormenta y factor de reducción.
- Definición de bloques alternos o hietogramas para los periodos de retorno seleccionados.
- Definición del número de intervalos N_i .

- Cálculo de la intensidad máxima en la curva IDF correspondiente al periodo de retorno de diseño.
- Cálculo de la lámina total para el intervalo L_t .
- Cálculo de la lámina de cada intervalo L_i .
- Cálculo de la intensidad de cada intervalo I .
- Hietogramas para cada escenario de diseño.
- Para la conversión de datos de precipitación a caudal, los cálculos de caudales se realizan con el programa HEC- HMS utilizando el método SCS, obteniendo un caudal para cada uno de los conjuntos de datos.
- Obtención de caudal para cada escenario de diseño.

3.2.3. Simulación hidráulica

Una vez obtenido el caudal de diseño se obtienen las dimensiones del canal.

El cálculo de las dimensiones de los canales para cada uno de los escenarios se desarrolla con las siguientes actividades:

- Ordenación de caudales de ingreso por escenario.
- Dimensionamiento previo usando programa HCANALES.
- Después del dimensionamiento previo, se realiza una modelación hidráulica en un tramo del arroyo muestra con la herramienta HEC- RAS.
- Obtención del diseño final de cada canal por escenario.

- Cálculo del volumen interno.

3.3. Análisis Comparativo entre los resultados de los distintos escenarios.

Teniendo los resultados de los cinco escenarios, en esta etapa se analiza comparándolos con respecto a el escenario del modelo Mejía o escenario 1. Con el fin de establecer variabilidad y determinar los efectos en el diseño hidráulico.

Para ejecutar este proceso se usaron las siguientes herramientas y se llevaron a cabo las siguientes actividades.

3.3.1. Análisis de parámetros sensibles.

- Diagrama de caja de caudales
- Diagrama de caja de tirante normal
- Diagrama de caja de precipitación total

Con los diagramas se posibilita la observación de los conjuntos de datos. Para identificar la ubicación del conjunto en los cuartiles del diagrama. De lo cual se infiere una distancia de la media que permite aceptar y rechazar.

3.3.2. Análisis de costos.

Se ejecuta teniendo en cuenta los precios de referencia del mercado encontrados en la revista Sispac (2020). Se estima el volumen interno por metro lineal de cada uno de los diseños resultantes y se multiplica por el valor por m³ tomados de la revista. Además de identificar y cuantificar la variación de cada uno de ellos al ser comparados con el escenario 1. Contraste de escenarios. E1 vs E2; E1 vs E3; E1 vs E4; E1 vs E5.

4. Datos e información

Primero se trata la información para caracterizar el alcantarillado pluvial de Barranquilla, con la finalidad de precisar la ubicación y antecedentes de intervención en los arroyos de la ciudad.

En segundo término, se presentan elementos del plan estratégico para arroyos de Barranquilla. Sobre aspectos hidrológicos, criterios de diseño, además del esquema de la red de drenaje.

Por último, se muestran datos e información de la cuenca de Rebolo y su red de drenaje. De manera específica se trata la situación actual, revisión de tramos canalizados, examen de puntos críticos, trazado preliminar de la red, delimitación de microcuencas, estimación de caudales de microcuencas y dimensionamiento hidráulico.

4.1. Análisis de contexto

Tener en cuenta el contexto y la trayectoria de los estudios para la solución del drenaje urbano del Distrito es importante para caracterizar la muestra dentro del universo delimitado. Dicha muestra será la cuenca del arroyo Rebolo, la cual es escogida por su distancia media entre las dos estaciones pluviométricas del Distrito.

4.1.1. Ubicación del Distrito y zona en estudio.

Se delimita como zona de estudio general el Distrito de Barranquilla, en el Departamento del Atlántico de la República de Colombia. Para mayor detalle se presenta la Figura 3.



Figura 3 Ubicación de la zona en estudio. Fuente: EcuRed.

Según (El clima promedio en Barranquilla, 2020). En Barranquilla el clima se puede dividir en dos temporadas. La temporada de lluvia es nublada y la temporada seca es ventosa y parcialmente nublada. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 24 °C a 32 °C y hay pocos registro en los que bajan a menos de 23 °C o suba a más de 34 °C.

La temporada más mojada dura 6,3 meses, de 9 de mayo a 19 de noviembre, con una probabilidad de más del 24 % de que cierto día será un día mojado. La probabilidad máxima de un día mojado es del 48 % el 17 de octubre.

Adenas los autores de (El clima promedio en Barranquilla, 2020) describen. La temporada más seca dura 5,7 meses, del 19 de noviembre al 9 de mayo. La probabilidad mínima de un día mojado es del 0 % el 18 de enero.)

La temporada de lluvia dura 8,4 meses, del 9 de abril al 21 de diciembre, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 milímetros. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 14 de octubre, con una acumulación total promedio de 122 milímetros.

Por ultimo, los autores de (El clima promedio en Barranquilla, 2020) expresan que. El periodo del año sin lluvia dura 3,6 meses, del 21 de diciembre al 9 de abril. La fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 26 de enero, con una acumulación total promedio de 1 milímetros.

Ahora con una vision del contexto de la ubicación y la lectura del clima promedio. Se realiza un recorrido en la historia de los estudios relacionados.

4.1.2. Antecedentes.

Aunque existe amplia información histórica sobre los arroyos en Barranquilla se mencionaran los más importantes comenzado desde la perspectiva del autor Malabeth. (1946). a continuación se restringe la cronología a las intervenciones administrativas enfocadas a la solución de la problemática.

De acuerdo a Malabeth Con el paso del tiempo, a principios del siglo XX, cuando la expansión urbanística y económica de la ciudad de Barranquilla se convierte en exponencial, se da inicio a las primeras noticias sobre problemas de movilidad de la población durante y después de lluvias o tormentas.

Con base en las voces de protesta de la población, el gobierno local comienza a explorar soluciones. Para lo cual en 1920 contrata la primera consultoría para que abordara el problema.

La casa R.W. Herbard & Company Inc. de Nueva York fue la encargada de proponer una solución.. (Diario El Comercio, 1925).

No obstante, para esa época, se toman las primeras soluciones puntuales para los arroyos más grandes y peligrosos. Como la canalización de la primera etapa del tramo final del arroyo más caudaloso de la ciudad: el arroyo Rebolo. Obra que fue inaugurada en septiembre de 1962. (Revista SIDA, 1983, pp.33-43).

Según descripción de Jorge Villalon (2000) posteriormente, en 1975, se propuso un estudio técnico-económico por parte de la firma Senior & Viana, Paternostro y Medina "CONASTEC", para solucionar la problemática de los arroyos de Felicidad, La Paz, Bolívar y Hospital. En ese mismo año (1975) el Ministerio de Obras Públicas acomete la canalización del Arroyo Rebolo y el Country.

Posteriormente se adelantan varios estudios de factibilidad realizados por las Empresas Públicas Municipales y el Ministerio de Obras públicas para un sistema de alcantarillado pluvial basado en el enterramiento de grandes tubos de 4 a 5 metros de diámetro. Y nuevamente, el proyecto se consideró irrealizable por los costos altos de las tuberías, las excavaciones, rompimiento del concreto de las calles, relocalización de redes subterráneas de teléfono, gas, acueducto, alcantarillado, entre otros. (Villalon, Jorge, 2000).

En 1986, se realizó el estudio de drenaje urbano para Barranquilla, a cargo de la Agencia de Cooperación Internacional de la Misión Japonesa (JICA). Durante varios meses estuvo en Barranquilla un grupo de profesionales y técnicos japoneses que estudiaron la situación financiera, los servicios públicos. Especialmente, el tráfico de la ciudad. Como resultado del trabajo se presentaron dos planes a consideración del municipio y su área metropolitana: un Plan

Maestro de Transporte y un Estudio de Factibilidad para el Distrito de Barranquilla. (JICA, 1993)

El estudio de la Misión Japonesa propuso que la solución integral y definitiva era la construcción de un alcantarillado pluvial. La solución planteada por la Misión se basaba en adelantar la canalización de los arroyos que impactan las vías de la ciudad. En tanto que, para los arroyos de la zona suroccidental, el plan contempló otras medidas encaminadas a controlar las inundaciones.

En marzo de 1997, Fonade-Hidroestudios S.A y ConCEP Ltda. presentó el Estudio de Factibilidad y Diseño de Soluciones al Drenaje Pluvial de la ciudad de Barranquilla

A lo largo de la línea de tiempo presentada, se muestran los antecedentes de las soluciones propuestas a los arroyos de Barranquilla, antes de llegar al actual plan estratégico de orientado a solucionar el problema de los arroyos en la ciudad de Barranquilla.

4.2. El plan estratégico para la solución de drenaje urbano en el Distrito de Barranquilla.

En el año 2014 se crea el plan estratégico para la solución de drenaje urbano para el Distrito de Barranquilla.

El Fondo Español para Latinoamérica y el Caribe (SFLAC), en consideración a la problemática de Barranquilla, otorgó a la ciudad de Barranquilla una donación con el fin de asistir al gobierno local en la preparación de solicitud de crédito ante el Banco Mundial del: “Proyecto integral para el diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado pluvial del distrito de Barranquilla – Colombia”.

El proyecto se dividió en dos etapas:

- La preparación del proyecto de inversión, a cargo de AGBAR-AQUALOGY.
- La implementación del proyecto.

La primera etapa se denominó “Plan Estratégico Para La Solución De Drenaje Urbano Para el Distrito de Barranquilla” el cual denominaremos Plan estrategico o escenario 5 en algunos casos en la investigacion. El cual, es usado como uno de los escenarios a comparar. De esta manera, analizar la variabilidad ante los demás escenarios hidrológicos de diseño. Además el informe del Plan Estrategico aporta los parametros hidráulicos y de diseño fijos para el proceso de modelacion y simulacion.

La información obtenida en el informe de diseño muestra que el Distrito de Barranquilla contrató a la firma española “*Aqualogy*” para realizar un estudio hidrológico, a partir del cual se crea el prediseño de una red de drenaje de las cuencas orientales de la ciudad.

4.2.1. Estudio hidrológico del plan estratégico para la solución del drenaje urbano en el distrito de Barranquilla

El estudio hidrológico contiene los caudales de diseño de la red, los criterios de diseño de la red y los pre - diseños realizados para las diversas cuencas.

En el estudio hidrológico se caracterizó el proceso del ciclo del agua en la zona de estudio, cuantificando factores con el fin de estimar y predecir eventos. Como tormentas, precipitaciones, evaporación, evapotranspiración y escorrentía. El análisis se adelanta con el fin de calcular caudales pico o caudales de diseño con diferentes periodos de retorno.

En el Plan estratégico se realizan modelos de precipitación – escorrentía. Para la modelación y simulacion se utilizó el programa HEC – HMS. El programa calcula la escorrentía superficial que genera una determinada lluvia partiendo de variables pluviométricas,

morfológicas e hidrológicas. Parámetros que calculan el caudal pico en el periodo de retorno de diseño, así como el hidrograma completo.

En el Plan Estratégico se hace un estudio a nivel de todas las cuencas y subcuencas de los arroyos de Barranquilla.

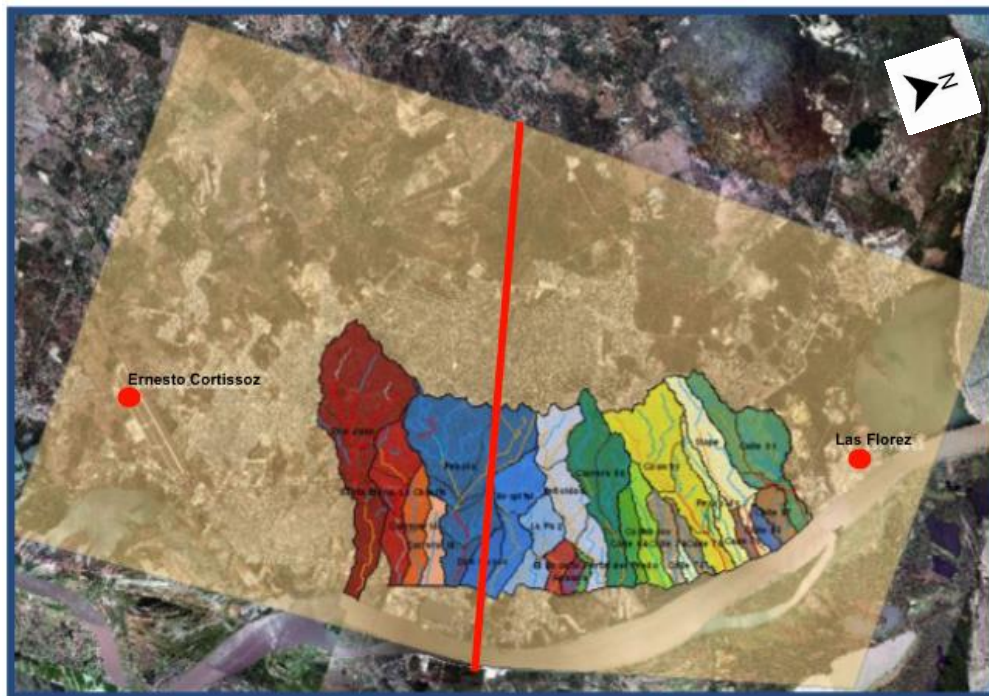


Figura 4 Esquema general de cuencas de arroyos en Barranquilla. *Fuente:* informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

En la Figura 4 se observa cómo se dividen por colores cada una de las cuencas que alimentan a los distintos arroyos de la ciudad de Barranquilla. Cómo dividen el estudio hidrológico en dos partes. En la parte izquierda los datos relacionados con la estación pluviométrica del aeropuerto Ernesto Cortissoz y los de la derecha se realizan con la estación pluviométrica de Las Flores.

Las delimitaciones de las cuencas y sus cauces se obtuvieron por medio de la herramienta ArcGis por parte del plan estratégico.

Las estaciones pluviométricas de la ciudad de Barranquilla se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Datos de estaciones meteorológicas.

Nombre de la estacion	Codigo	Latitud	Longitud	Elevacion
Las Flores	29045120	1102	7449	2 (m.s.n.m)
Aeropuerto Ernesto Cortissoz	29045020	1053	7446	14 (m.s.n.m)

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

Según el informe del Plan Estrategico. (2014). Para determinar la precipitación máxima diaria de cada periodo de retorno en cada estación se realiza un ajuste probabilístico, ejecutando tres metodologías distintas: Gumbel, SQRT y Log Pearson III. Al finalizar seleccionaron la metodología de Gumbel, por ser el método que mejor se ajusta tanto a periodos de retornos bajos y altos.

A continuación, se muestran valores de precipitación finalmente seleccionados en mm en la Tabla 2.

Tabla 2

Estación pluviométrica y precipitaciones máximas diarias (mm).

Nombre de la estacion	Periodos de retorno							
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=500
Las Flores	89,15	117,11	135,62	159,00	176,35	193,58	210,74	233,38
Aeropuerto Ernesto Cortisoz	81,50	104,58	119,87	139,18	153,50	167,72	181,89	200,58

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

Adicionalmente, se agregó un factor corrector de la precipitación según la normativa vigente del momento del estudio R.A.S.(2000). El cual se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3

Cuenca, subcuencas, áreas y coeficiente de reducción de área.

Cuenca	Subcuenca	Area (Km2)	Coef. RAS
Rebolo	Arroyo Rebolo 1	1,172	0,95
	Arroyo Rebolo 2	0,726	0,99
	Arroyo Santuario	3,569	0,93
	Viacanal K211	1,985	0,95
	Viacanal K212	0,443	1

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

El factor de corrección o coeficiente de reducción de área, presentado en el Reglamento de acueducto y saneamiento o R.A.S. (2000). Se determina dependiendo de la magnitud de área en estudio.

En la Tabla 4 se observan los valores de precipitación para cada periodo de retorno.

Tabla 4

Precipitaciones según periodo de retorno.

Subcuenca	CTi	CTi	Precipitacion (mm/día)							
	Flores	Cortissoz	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=500
Arroyo Rebolo 2	0	1	80,7	103,5	118,7	137,8	152	166	180,1	198,6
Arroyo Rebolo 1	0,17	0,83	78,7	101,4	116,4	135,4	149,5	163,5	177,5	195,9
Arroyo Santuario	0	1	75,8	97,3	111,5	129,4	142,8	156	169,2	186,5
Viacanal K211	0,66	0,34	82,2	107,2	123,8	144,7	160,2	175,6	190,9	211,1
Viacanal K212	0	1	81,5	104,6	119,9	139,2	153,5	167,7	181,9	200,6

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

Ademas el Plan Estrategico con los valores de precipitaciones diarias puede calcular, aplicando el modelo de precipitación – escorrentía, la distribución temporal de la intensidad de esta durante la tormenta siguiendo la metodología de Témez (1998)

Dando como resultado el hietograma adimensional que en el informe de diseño y que se muestra a continuación en la *Figura 5*

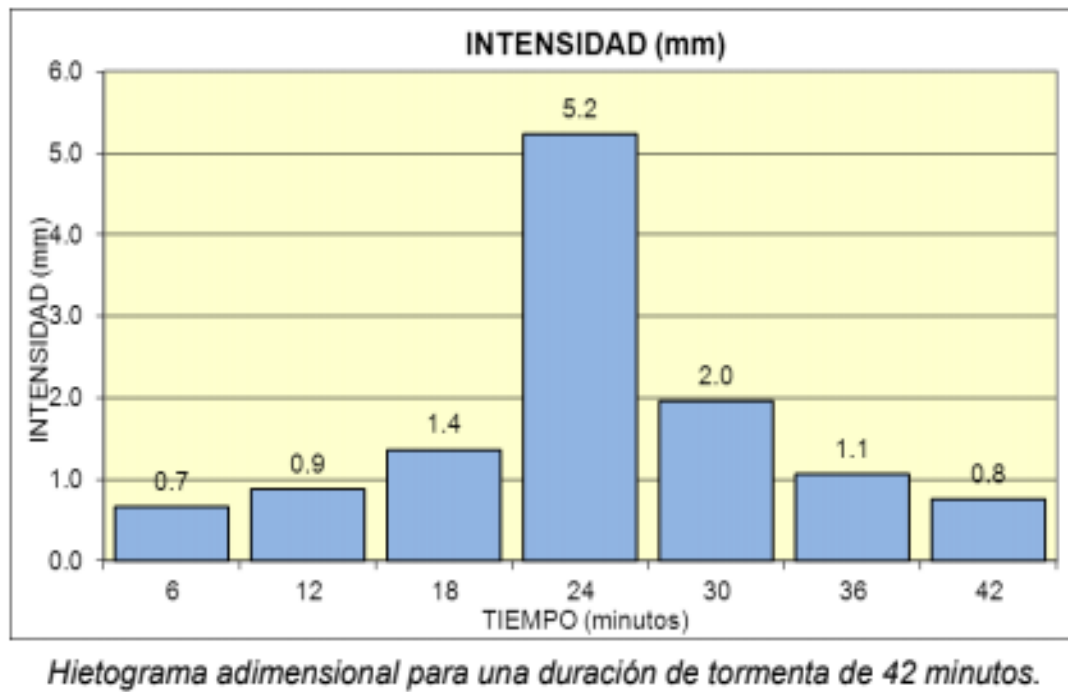


Figura 5 Bloque alterno a periodo de retorno de 10 años. Fuente: Hietograma adimensional. Fuente: informe del Plan Estratégico. (2014).

Para hallar los caudales para cada periodo de retorno y para cada cuenca y subcuenca se utiliza el programa HEC – HMS. Este calcula la escorrentía superficial, para ello es necesario ingresarle los valores del hietograma adimensional previsto y los siguientes parámetros para la simulación presentados a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros para usar para la modelación hidrológica y obtención de caudal por medio del HEC-HMS.

Cuenca	Subcuenca	Area (km2)	Long (m)	J (m/m)	Tc (h)	tr (min)	NC
Rebolo	Arroyo Rebolo 2	1,17	1639,8	0,016	0,6	21,7	91,83
	Arroyo Rebolo 1	0,73	1026,2	0,006	0,62	22,37	92,62
	Arroyo Santuario	3,57	3028,1	0,014	1,19	43,02	91,38
	Viacanal K211	1,98	3026,9	0,021	0,97	34,84	92,11
	Viacanal K212	0,44	900,8	0,01	0,42	15,02	91,8

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del Distrito de Barranquilla.

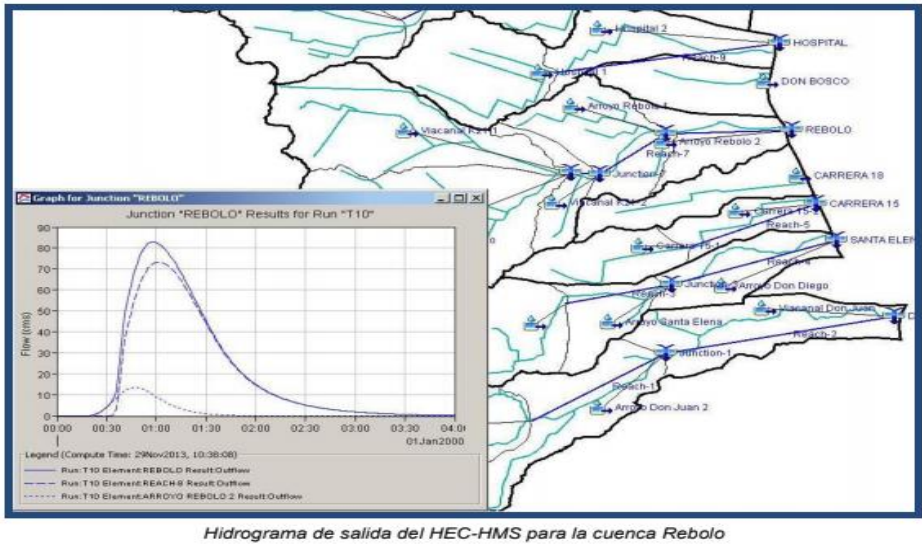


Figura 6 Hidrograma de salida del HEC-HMS. Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla, (2014)

El proceso visto en la Figura 6 se realizó por parte del Plan estratégico para cada periodo de retorno en las cuencas, dando como resultado lo que se muestra a continuación en la Tabla 6 para la cuenca en estudio:

Tabla 6

Cálculo de caudales por cuenca y subcuencas por periodo de retornos.

Cuenca	Subcuenca	Caudales (m ³ /s)					
		T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200
Rebolo	Rebolo	67,7	82,9	102,7	117,5	132,4	147,3
	Arroyo Santuario	27,5	33,6	41,4	47,4	53,3	59,3
	Viacanal K211	22,2	27,1	33,3	38,1	42,8	47,5
	Viacanal K212	8,5	10,3	12,7	14,4	16,1	17,9
	Arroyo Rebolo 1	17,1	20,8	25,6	29,1	32,7	36,3
	Arroyo Rebolo 2	11,3	13,6	16,6	18,8	21	23,2
	Jumction - 6	48,6	59,4	73,2	83,7	94,1	104,6
	Jumction - 7	50,3	61,5	75,8	88,7	97,5	108,4
	Jumction - 8	60	73,4	90,8	103,9	117	130,1

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

4.2.2. Criterios de diseño

Para el diseño de una red de drenaje es necesario exponer criterios claros que consideren restricciones o beneficios que tenga el proyecto para cumplir su funcionalidad..

Lo primero que contemplaron los consultores en el diseño del Plan Estratégico fue el tipo de drenaje que se requería en la ciudad para llevar las aguas de forma segura e higiénica.

Para ello se propuso una red subterránea de drenaje. En la línea del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (R.A.S. 2000). Se determina de acuerdo con la

a la magnitud del área, los daños, perjuicios y molestias; que las inundaciones periódicas podrían ocasionar. Los cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Periodos de retorno de diseño según el RAS 2000.

Características del area del drenaje	Minimo (años)	Aceptable (años)	Recomendable (años)
Tramos de alcantarillado con areas tributarias entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con areas tributarias mayores a 10 ha	5	5	10
Canales abierto en zonas planas y que drenan areas mayores de 1000 ha	10	25	25
Canales abiertos en zona montañosa (alta velocidad) o a medida ladera, que drenan areas mayores a 1000 ha	25	25	50

Fuente: informe del Plan Estratégico

Para el Plan Estratégico se determina por los consultores un periodo de retorno de 10 años. El cuál es el recomendado por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000). Así como también se exponen las profundidades mínimas según el trayecto del sistema, las velocidades mínimas para garantizar autolimpieza, las máximas según especificación del material para evitar abrasión y se determina diseñar las secciones con un coeficiente de *Manning* de 0.013 argumentando que no hay seguridad de una construcción ni un mantenimiento que permita disminuir este valor, además de ayudar en la seguridad de funcionamiento del sistema.

Para ello en el siguiente paso se deciden los materiales a utilizar.

Tomando en consideración cada una de las cualidades y debilidades de los materiales recomendados por el reglamento, RAS 2000.

4.2.3. Diseño de la red de drenaje

El estudio del plan estratégico involucró el drenaje de la vertiente oriental del Distrito de Barranquilla, dividido en cuencas hidrográficas. Generado bajo un esquema que establece la siguiente metodología de diseño:

- Descripción de la situación actual de la cuenca: en este apartado se explica cómo está drenando actualmente la cuenca, con los sistemas construidos.
- Revisión y chequeo de periodo de retorno en tramos canalizados: Se realiza un chequeo de las secciones del sistema de drenaje actual determinando si su periodo de retorno es igual o superior a 10 años: se acepta. Si es menor es necesario su reconstrucción o analizar una solución para poder cumplir con una eficiente hidráulica durante su drenaje.
- Revisión de puntos críticos: en este punto se hace una revisión de detalle de las direcciones de flujo de la cuenca, detectando y analizando aquellos puntos que en principio puedan parecer críticos. Los puntos para considerar son aquellos en los que se producen cambios bruscos de dirección, de pendiente o contrapendiente, cruces de vías principales de comunicación, *box – culvert* con problemas de capacidad o desbordamientos. Se concluye si el punto afectará o no el diseño de la red.
- Trazado preliminar de la red: Este trazado se realiza con base a la cartografía y el modelo digital del terreno ya empleado en los estudios previos. Para ejecutarlo se tuvo en cuenta la información prevista, intentado evitar, en caso de requerir los

puntos críticos detectados, recoger mayor escorrentía e integrarlo, si es posible, con la infraestructura hidráulica existente en la ciudad, tales como canales, box culverts, etc.

- Delimitación de microcuencas: Este paso es ejecutado en paralelo al anterior de trazado de los colectores, ya que se expone que está directamente relacionado, no siendo posible delimitar con exactitud si no se tiene idea previa del trazado de los colectores que circulan dentro de la misma. Por ello las microcuencas se han delimitado no sólo teniendo en cuenta la orografía de la propia cuenca, sino los trazados previstos tanto de los colectores principales como de los secundarios y callejeros de la ciudad.
- Estimación de caudales: Con base en los caudales obtenidos en el estudio hidrológico previsto, se determinan los caudales circulantes por cada uno de los tramos. Para determinar el caudal de cada microcuenca, se establece una relación proporcional al área de la microcuenca correspondiente respecto al caudal y área de la subcuenca en que está ubicada, determinando el caudal circulante en cada tramo, y proceder a realizar el dimensionamiento.
- Dimensionamiento hidráulico: Una vez precisados los colectores, delimitadas las microcuencas y determinados los caudales de escorrentía en cada una de ellas, se procede a asignar los caudales circulantes por cada tramo para su dimensionamiento. En cada tramo, se ha considerado el caudal entrante proveniente de colectores o cuencas superiores y también el caudal completo de la cuenca en que está ubicado el tramo, quedando de esta forma siempre del lado de la seguridad. El dimensionamiento hidráulico, se ha realizado con el programa *FlowMaster*

aplicado en el diseño hidráulico y análisis de canales abiertos, acequias, zanjas, tuberías, vertederos, etc. Utiliza fórmulas de Darcy – Weisbach, Hazen – Williams, de Kutter y de Manning. Obteniendo los calados, velocidades de agua, etc. En función a los datos introducidos.

Los datos de entrada requeridos son los siguientes: Pendiente, número de *Manning*, caudal circulante, dimensiones de cada una de las calles. En este caso la variable a determinar es la dimensión, para la cual se hacen diferentes tanteos con el programa, hasta determinar aquellas dimensiones adecuadas para cada tramo con base en los criterios previamente establecidos. Respecto a las capacidades de cada una de las secciones de tuberías, a la hora de determinar el diámetro necesario, se considera un porcentaje máximo de utilización de 85% de la capacidad máxima del tubo, que equivale al 75% del calado de este. Mientras que en el caso de las secciones rectangulares se considera un resguardo mínimo de 25 cm, como se ha mencionado en el apartado de criterios de diseño.

4.3. Datos cuenca de Rebolo

Para el estudio se toma la cuenca con mayor caudal, fatalidad y agresividad de la ciudad: El Arroyo Rebolo.

El arroyo es útil para la investigación porque se encuentra a una distancia media entre las dos estaciones pluviométricas de la ciudad. Además, cuenta con la superficie de mayor extensión de área aferente en todo el distrito de Barranquilla. Es decir, es un punto crítico de drenaje.

4.3.1. Situación actual.

La cuenca está dividida en 5 subcuencas, cuyas extensiones y caudales se adjuntan en la Tabla 8 que sigue. La superficie total de la cuenca es de 7.89 Km² o 789 hectáreas y el caudal total asociado al periodo de retorno es de 82.9 m³/s. Presentado a continuación:

Tabla 8

Caudal de cuenca y subcuenta a un periodo de retorno de 10 años.

Cuenca	Subcuenca	Area (km2)	Caudal T10 (m3/s)
Rebolo	Arroyo Rebolo 2	1,17	20,8
	Arroyo Rebolo 1	0,73	13,6
	Arroyo Santuario	3,57	33,6
	Viacanal K211	1,98	27,1
	Viacanal K212	0,44	10,3

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

En la Figura 7 se muestra los cauces principales de la cuenca Rebolo clasificado por colores en no canalizados, canalizados y vía canal. Y su división en subcuencas.

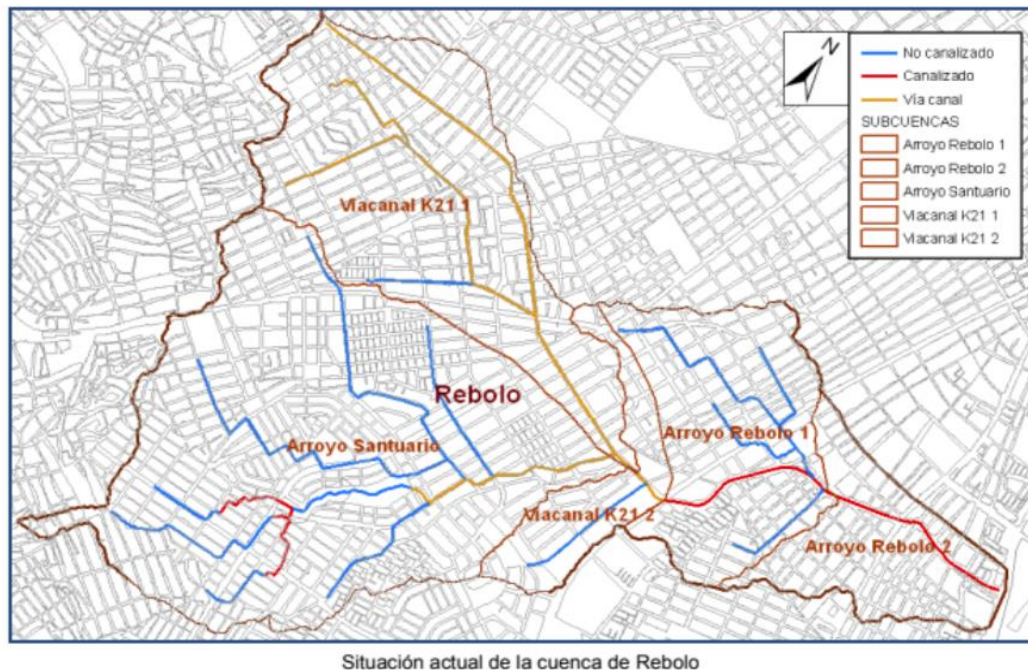


Figura 7 Estado de la cuenca antes de la intervención. Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

4.3.2. Revisión de tramos canalizados.

En la cuenca Rebolo existen 7 tramos canalizados, 3 de ellos se ubican inmediatamente aguas arriba del Jardín Botánico por lo que no entran en consideración en el Plan Estratégico, comprobándose los 4 canales ubicados aguas abajo del mismo. En los cuatro tramos al analizar las dimensiones y chequearlas, dan como resultado en el diagnóstico del Plan Estratégico que estos tramos tienen secciones que equivale a un periodo de retorno de diseño superiores a los 200 años.

En la Figura 8 se muestra la localización en la cuenca de los tramos canalizados, clasificados por colores en función de su capacidad máxima según su periodo de retorno.

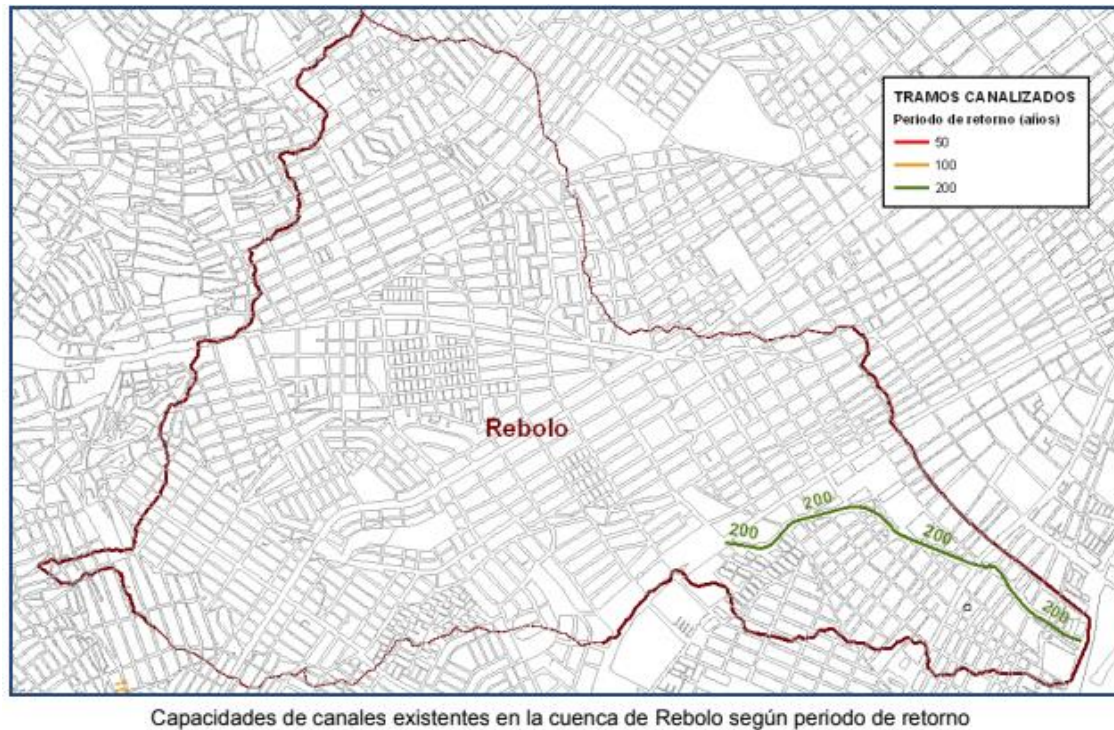


Figura 8 Periodo de retorno de diseño para tramos canalizados. Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

Todos los tramos canalizados tienen un periodo de retorno superior a los 10 años empleados, los cual es lo que recomienda el RAS 2000. Por ende, no es necesario realizar ningún tipo de modificación en los mismos. Por lo tanto, se diseña el resto de la red considerando la posibilidad de acometida directa a estos canales.

4.3.3. Revisión de puntos críticos.

No se encuentran puntos críticos en esta cuenca, comprobándose que las calles de la zona disponen de la anchura suficiente para diseñar la red de drenaje sin problema.

4.3.4. Trazado preliminar de la red.

Teniendo en cuenta los canales existentes se plantean dos ejes principales que se presentan a continuación.

4.3.4.1. Viacanal K21.

Este eje está completamente ubicado en la subcuenca Viacanal K21-1 y en su último tramo en la subcuenca viacanal K21 -2 recorre el viacanal K21 tributario, desde la calle 63 hasta su confluencia con el viacanal K21 hasta su entronque con el tramo canalizado en el cruce de la carrera 21 con vía Boyacá. Tiene una longitud estimada de 2,530 metros.

Debido a la longitud y especialmente a la distribución de los caudales en la cuenca, se divide en cinco tramos que son los siguientes:

■ Calle 63 – 57

Este tramo tiene una longitud de aproximadamente 410 metros. La cota inicial es de 64.8 metros y la final de 52 metros. Con una pendiente media de 3.1%.

■ Calle 57 – calle 47

Este tramo tiene una longitud de 530 metros. La cota inicial es de 52 metros y la final de 41.8 metros, con una pendiente media del 1,9%.

■ Calle 47 – Calle 46.

Este tramo tiene una longitud de 450 metros. La cota inicial es de 41.8 metros y la final de 36 metros. Con una pendiente media de 1.3%.

■ Calle 46 – calle 35

Este tramo tiene una longitud de 910 metros. La cota inicial es de 36 metros y la final es de 21 metros, con una pendiente media de 1.6 %

■ Calle 35 – Boyacá.

Este tramo tiene una longitud de 230 metros. La cota inicial es de 21 metros y la final de 17.5 metros. Con una pendiente media de 1.4%.

4.3.4.2. Viacanal San José.

Este eje está ubicado en la subcuenca del arroyo Santuario. Su curso es el de la actual vía canal San José. Comenzando a la salida de un canal existente entre la carrera 14 y la carrera 21, donde entronca con la viacanal K21. Tiene una longitud estimada de 1.080 metros.

Debido a la longitud del eje y especialmente a la distribución de caudales en la cuenca, se divide en tres tramos que son los siguientes:

- Carrera 14 – carrera 17.

Este tramo tiene una longitud 240 metros. La cota inicial es de 32 metros y la final 29 metros, con una pendiente media de 1,3%.

- Carrera 17 – carrera 19.

Este tramo tiene una longitud de 370 metros. La cota inicial es de 29 metros y la final de 26 metros, con una pendiente media del 0.8%.

- Carrera 19 – carrera 21

Este tramo tiene una longitud de 470 metros. La cota inicial es de 26 metros y la final de 22,6 metros con una pendiente media del 0.7 %.

Estos tramos se muestran en el siguiente apartado junto con la microcuenca delimitada.

4.3.5. Delimitación de microcuencas.

En la *Figura 9* se muestra el trazado preliminar de la red antes mencionada y las microcuencas que delimitan sus tramos.

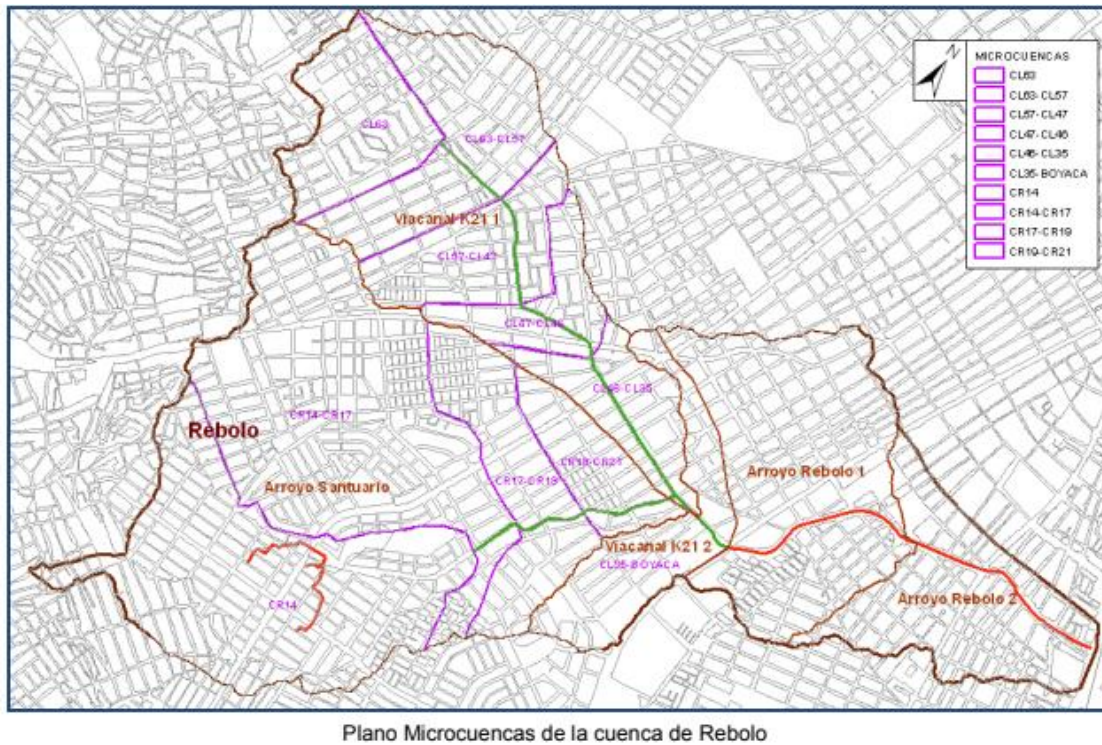


Figura 9 Delimitación de microcuencas. Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

4.3.6. Estimación de caudales de microcuencas

Los caudales obtenidos de cada microcuenca, para el periodo de retorno de 10 años se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Área y caudales de microcuencas.

Cuenca	Subcuenca	Area (km2)	Area (Km2)	Caudal T10 (m3/s)
Rebolo	Arroyo Santuario	CR14	1,31	12,29
		CR14-CR17	1,49	14,04
		CR17-CR19	0,51	4,78
		CR19-CR21	0,26	2,48
		CL63	0,42	5,71
	Viacanal K21-1	CL63-CL57	0,61	8,32
		CL57-CL47	0,4	5,45
		CL47-CL46	0,25	3,42
		CL46-CL35	0,31	4,21
	Viacanal K21-2	CL35-Boyaca	0,44	10,3

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

4.3.7. Dimensionamiento hidráulico.

El dimensionamiento hidráulico de cada tramo se realiza con el programa FlowMaster.

Cuyos resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Resultado de dimensionamiento hidráulico.

Nombre de tramo	Q10 (m ³ /s)	PTE (mm)	Seccion	Diametro /anchura (mm)	Altura (mm)	V(m/s)	Utilizacion (%)/resguardo (cm)
TR_CR14-CR17	26,34	0,013	Rectangular	2250	2000	6,79	28
TR_CR17-CR19	31,2	0,008	Rectangular	3000	2000	5,96	26
TR_CR19-CR21	33,6	0,007	Rectangular	3500	2000	5,78	34
TR_CL63-CL57	14,03	0,031	Circular	1700	-	8,52	68,12
TR_CL57-CL47	19,47	0,019	Circular	2000	-	7,59	76,15
TR_CL47-CL46	22,89	0,0013	Rectangular	2000	2000	6,5	24
TR_CL46-CL35	27,1	0,0016	Rectangular	2250	2000	7,41	37
TR_CL35-Boyaca	71	0,014	Rectangular	3500	2500	9,01	25

Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

A continuación, se muestra la Figura 10 con la red diseñada por el plan estratégico y sus dimensiones.

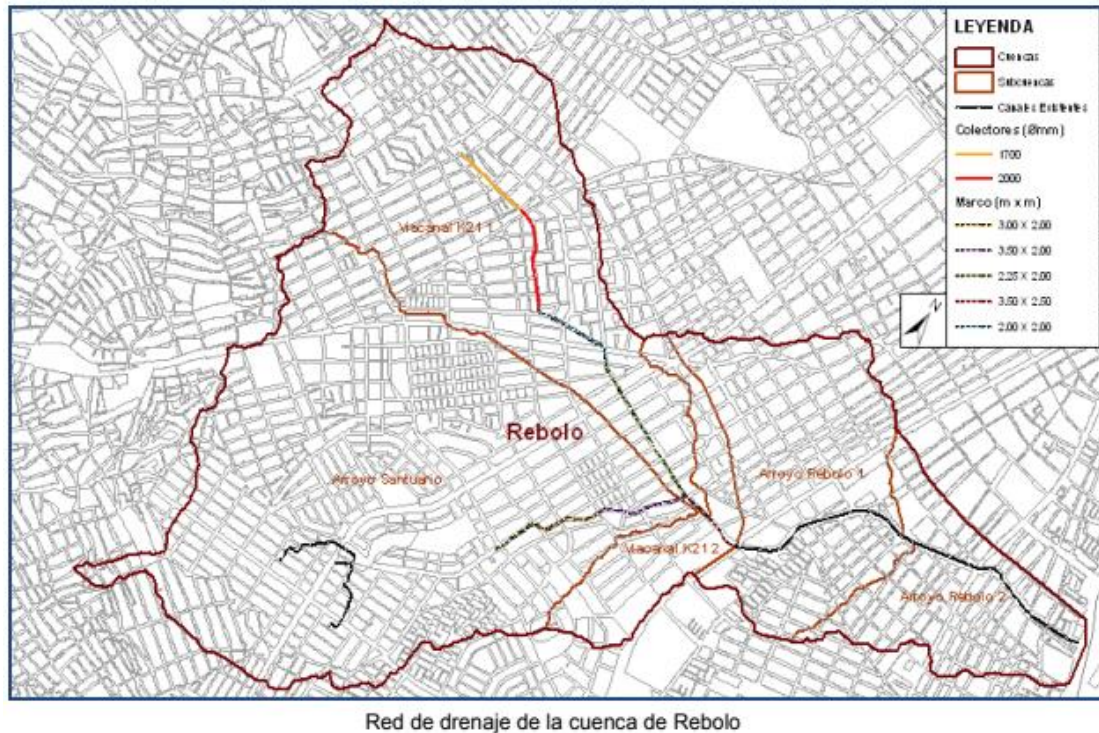


Figura 10 Red de drenaje de la cuenca de Rebolo. Fuente: informe del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del distrito de Barranquilla.

Con esto se concluye un recorrido por la historia de los estudios y el proceso realizado por el último proyecto de inversión de solución para el drenaje de la ciudad de Barranquilla. Importante para poder comprender el contexto y las implicaciones del entorno en estudio, determinantes para la investigación. Obteniendo de este capítulo los parámetros fijos y dos escenarios para comparar. Los resultados presentados en el informe del Plan Estratégico. (2014) o escenario 5 y el Escenario 4 o Replicar del Plan Estratégico. Esta última será resultado de realizar la modelación y simulación con los parámetros previstos en este capítulo, intentando replicar los resultados.

5. Escenario de contraste con modelo Mejía

Mejía. (2017). Propone un método para la estimación de curvas IDF a partir de precipitaciones máximas en el Departamento del Atlántico para obras hidráulicas.

Con una estructura de modelo matemático ajustado en función de la media anual de las precipitaciones máximas en 24 horas, posibilita la generación de curvas IDF sintéticas vinculadas a mapas de isolíneas generadas con la aplicación de técnicas de interpolación espacial de los parámetros ajustados de la ecuación propuesta y de media anual de las precipitaciones máximas en 24 horas. Que, en suma, permiten determinar curvas IDF sintéticas en cualquier punto del Departamento del Atlántico, Colombia.

Con el modelo de Mejía se desarrolla la síntesis de una estación en el centroide de la cuenca de Rebolo. Una vez localizado el punto de centroide de la cuenca y sus coordenadas, se ubicó en planos de isolíneas que aportan cada uno de los parámetros a ingresar a la función de intensidad, duración y frecuencia. De esta manera se construyen las curvas IDF según el periodo de retorno a utilizar, usando la función IDF del modelo Mejía.

A continuación, se presentan las figuras resultantes del escenario 1 de esta investigación en la cuenca Rebolo, aplicando el modelo de Mejía. (2017).

En primera instancia se describe la delimitación de la cuenca de Rebolo, la cual se presenta en la *Figura 11*.

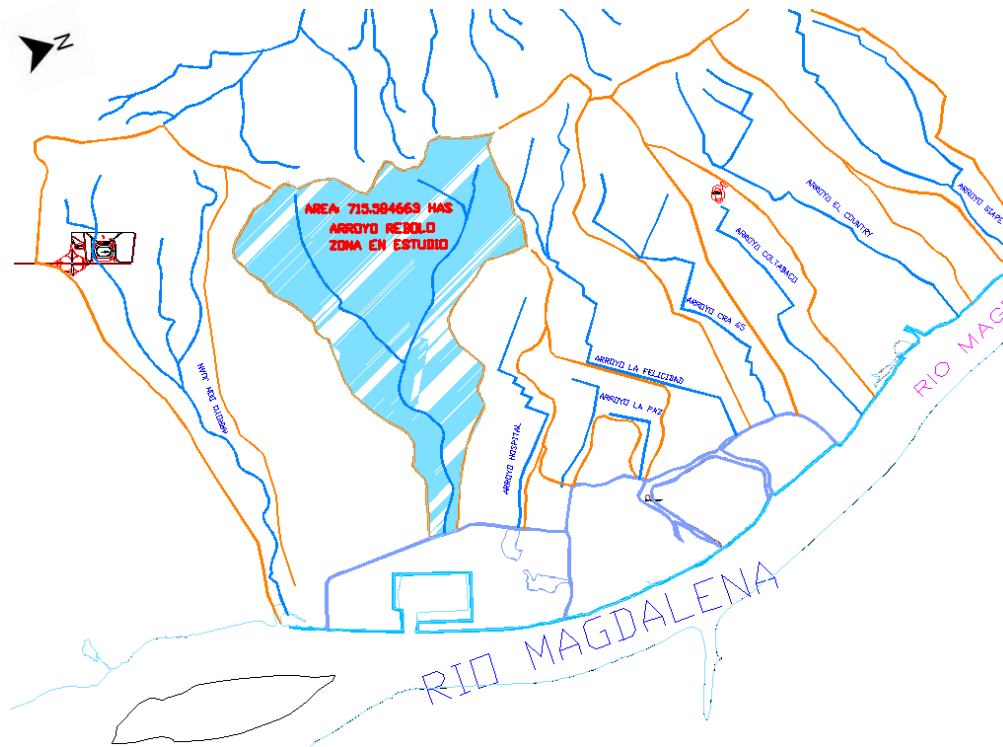


Figura 11 Ubicación y delimitación de la cuenca Rebolo. Fuente: el autor.

Se observa que el arroyo tiene desembocadura en el caño de La Ahuyama.

Las coordenadas del centroide de la cuenca de Rebolo son determinadas con la ayuda de Qgis software que permite analizar cuencas según sus áreas y delimitación. El resultado se presenta en la Figura 12.

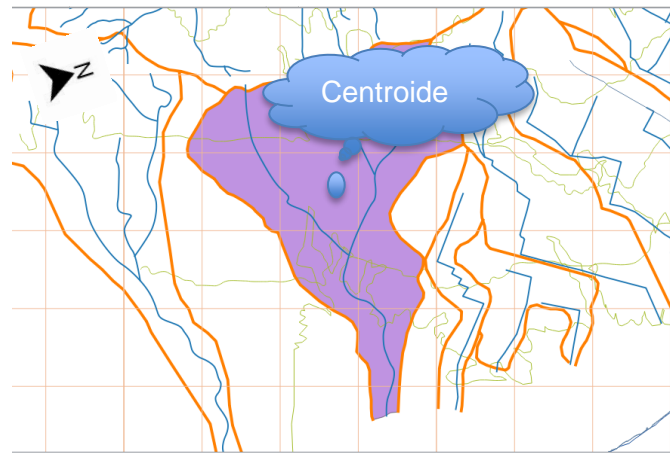


Figura 12 Centroide de la cuenca Rebolo. Fuente: propia del autor.

Se obtuvieron resultados que fueron verificados con la ayuda de *Google - Earth* respecto a su coherencia. Se presenta la Tabla 11 con los datos de la ubicación del centroide de la cuenca.

Tabla 11

Coordenadas del punto centroide de la cuenca Rebolo.

Norte		
Grados	Minutos	Segundos
10	57	21.57
Oeste		
74	47	24.92
Coordenadas planas (X,Y), para aplicar en plano de isoclinas del modelo Mejía		
X	Y	
921445.898	1703764.53	

Fuente: propia del autor.

Además, se obtienen las siguientes características morfométricas de la cuenca, descrito en la Tabla 12.

Tabla 12

Características morfométricas de la cuenca Rebolo, Qgis.

Area (ha)	782,24
Perimetro (m)	14619,37
Longitud del cauce principal (m)	5007,3974

Fuente: propia del autor.

Una vez obtenidos estos datos se procede a realizar la estimación de cada uno de los parámetros de la función por medio de los planos de isolíneas, según el modelo de Mejía. (2017).

5.1. Función IDF de modelo Mejía

Función IDF Mejía 2017.

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{t^c}$$

Donde:

a= parámetro a.

b= parámetro b.

c= parámetro c.

d= parámetro d.

M= Precipitación máxima diaria.

T = periodo de retorno.

t = tiempo de concentración.

5.2. Estimación de parámetros

Se estima cada uno de los parámetros ubicando el punto del centroide en cada uno de los planos de isolíneas.

5.2.1. Parámetro a

Para el parámetro “a” el plano de isolínea y el punto ubicado se muestra a continuación en la *Figura 13*.

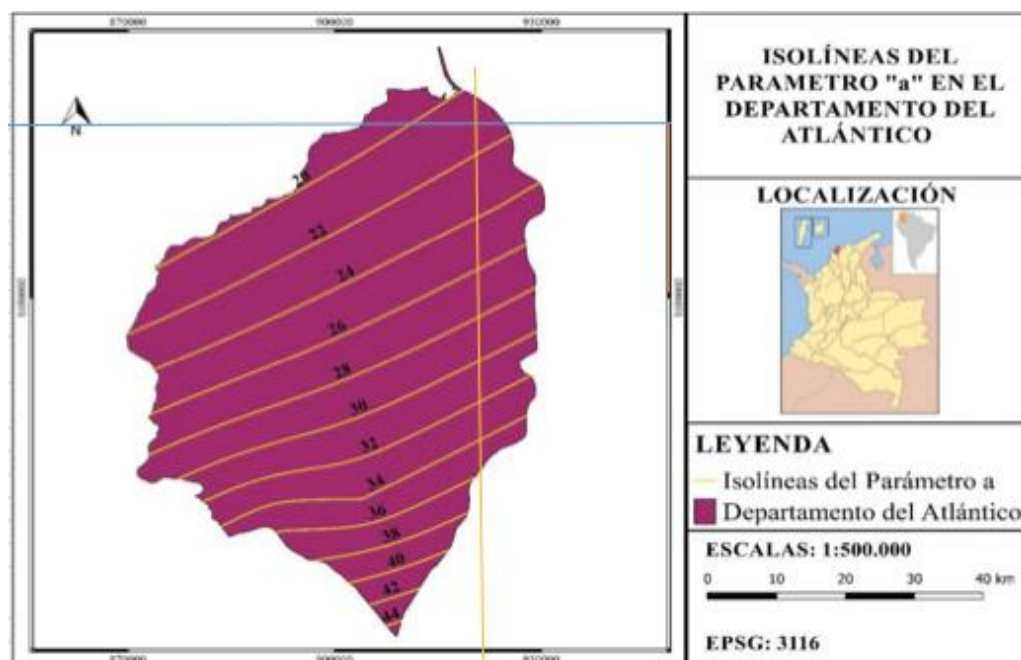


Figura 13 Parámetro a. Fuente: Mejía (2017).

Por lo que se observa el parámetro “a” se encuentra entre la línea 20 y 22, por ende, se estima el resultado como 21.

5.2.2. Parámetro b

Para el parámetro “b” el plano de isolínea y el punto ubicado se muestra a continuación en la *Figura 14*.

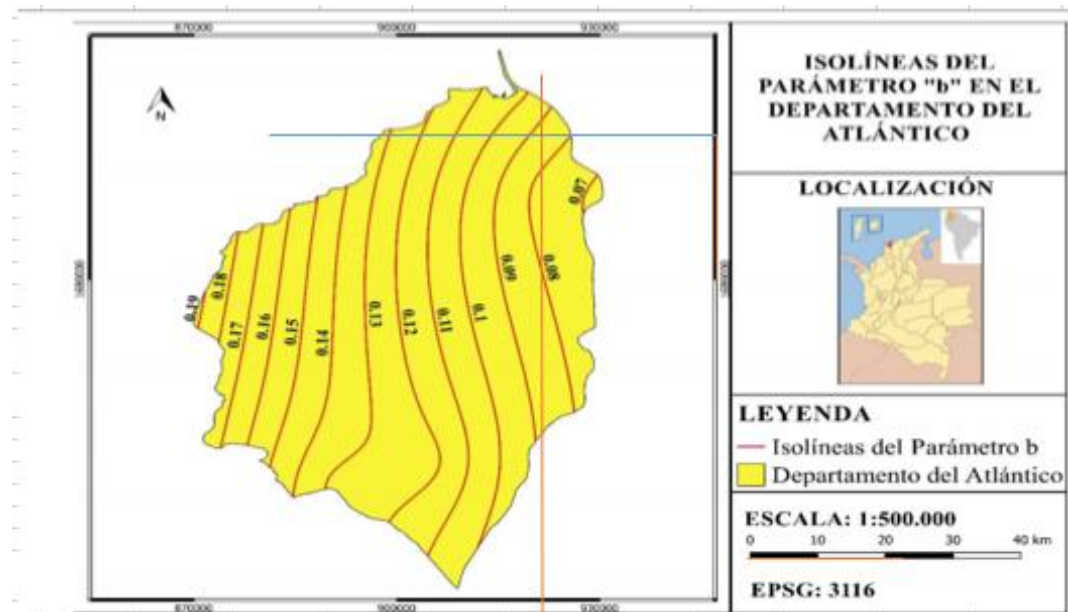
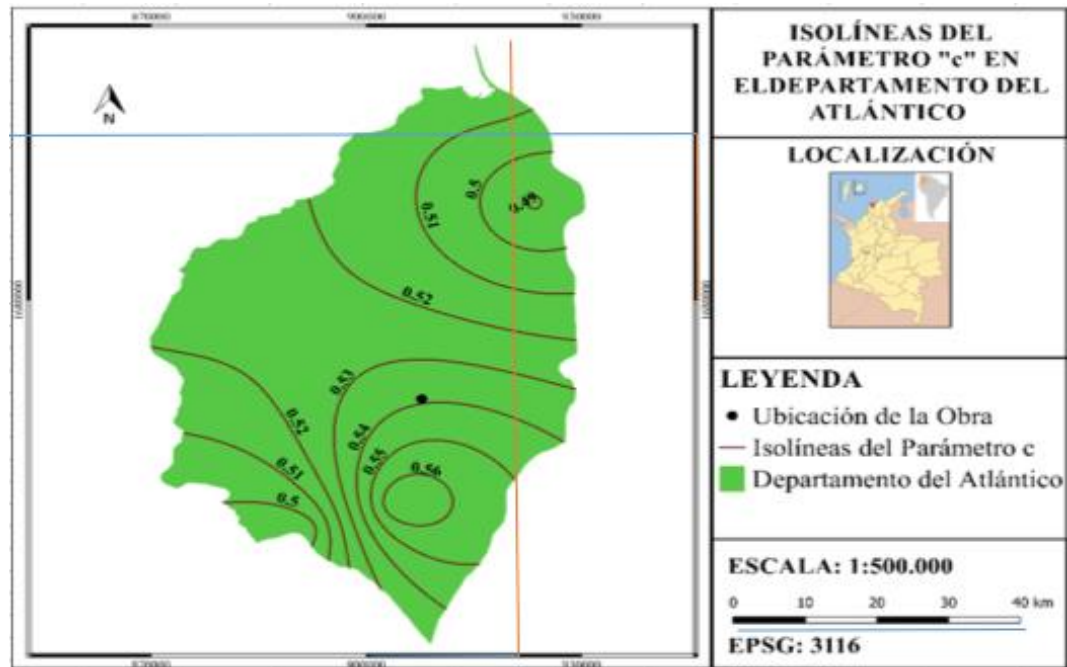


Figura 14 Parámetro b. Fuente: Mejía 2017.

Como resultado para el parámetro “b” se encuentra entre las líneas 0,08 y 0,09 se estima un valor de 0,085.

5.2.3. Parámetro c

Para el parámetro “c” el plano de isolínea y el punto ubicado se muestra a continuación en la Figura 15.



5.2.4. Parámetro d

Para el parámetro “d” el plano de isolínea y el punto ubicado se muestra a continuación en la *Figura 16*.

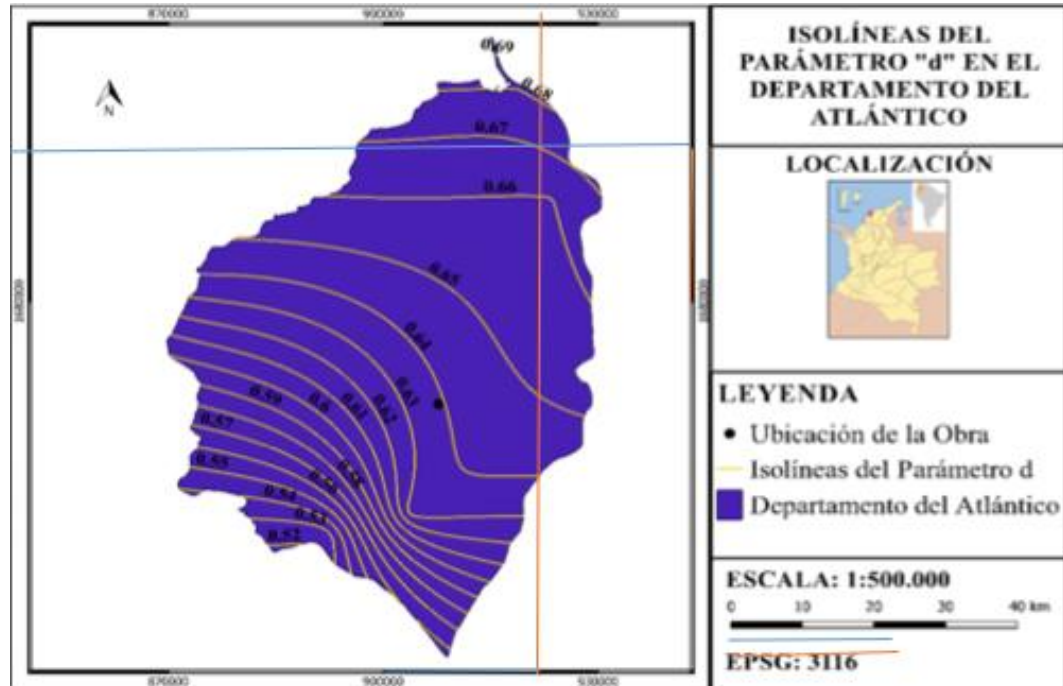


Figura 16 Parámetro d. Fuente: B. Mejía Arrieta 2017.

Como resultado el parámetro “d” se encuentra ligeramente por arriba de la línea 0,67 por ende se estima un valor de 0,675.

5.2.5. Parámetro M (precipitación máxima diaria)

Para el parámetro “M” el plano de isolínea y el punto ubicado se muestra a continuación en la *Figura 17*.

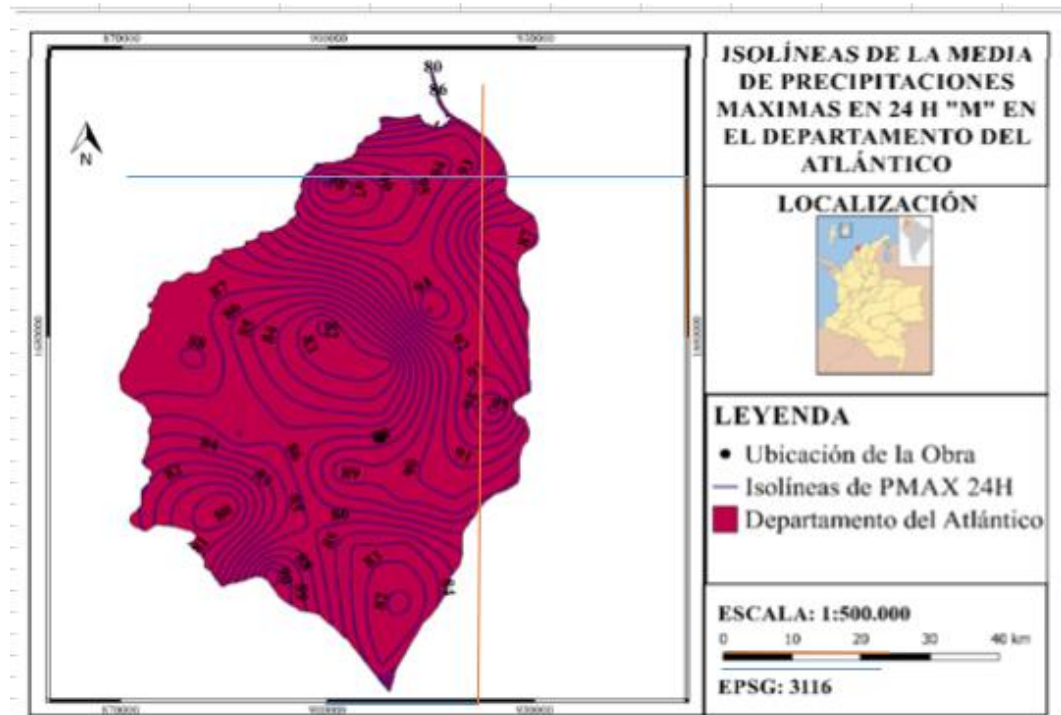


Figura 17 Parámetro de precipitación máxima diaria. *Fuente:* Mejía 2017.

Como resultado para el parámetro “M” se encuentra entre las líneas 93 y 92 se estima un valor de 92,5.

5.2.6. Parámetro t (tiempo de concentración) y para T (periodo de retorno)

Estos parámetros van a depender de la longitud del cauce principal y del periodo de retorno de diseño que enuncie la norma. No obstante, como es un escenario de contraste y el interés es establecer variaciones entre diferentes escenarios hidrológicos de diseño, se toman los mismos que plantea el Plan Estratégico

5.2.7. Construcción de curva IDF con modelo Mejía

Para la construcción de las curvas IDF según el centro de la cuenca Rebolo, se utilizarán los siguientes parámetros, presentados en la Tabla 13.

Tabla 13

Parámetros de la cuenca Rebolo para aplicar método de Mejía 2017.

Parametros , B. Mejia Arrieta, 2017	
a	21
b	0,085
c	0,495
d	0,675
M	92,5

Fuente: propia del autor.

Con estos datos se crea la siguiente tabla donde se muestran los valores de intensidad según duración y frecuencia.

Estos datos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 14

Intensidad, duración y frecuencia para la cuenca Rebolo con el método de Mejía (2017).

Tiempo (min)	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)					
	2	5	10	20	50	100
10	151,34	163,60	173,53	184,06	198,97	211,04
20	107,38	116,08	123,13	130,60	141,18	149,75
30	87,86	94,97	100,74	106,85	115,51	122,52
40	76,20	82,37	87,37	92,67	100,17	106,25
50	68,23	73,75	78,23	82,98	89,70	95,14
60	62,34	67,39	71,48	75,82	81,96	86,93
70	57,76	62,44	66,23	70,25	75,94	80,55
80	54,07	58,45	61,99	65,75	71,08	75,39
90	51,00	55,13	58,48	62,03	67,05	71,12
100	48,41	52,33	55,51	58,88	63,65	67,51
110	46,18	49,92	52,95	56,16	60,71	64,40
120	44,23	47,82	50,72	53,80	58,15	61,68
130	42,52	45,96	48,75	51,71	55,90	59,29
140	40,98	44,30	46,99	49,84	53,88	57,15
150	39,61	42,82	45,42	48,17	52,07	55,23
160	38,36	41,47	43,99	46,66	50,44	53,50
170	37,23	40,24	42,69	45,28	48,94	51,91
180	36,19	39,12	41,50	44,01	47,58	50,47

Fuente: propia del autor.

Con esta tabla se construye las curvas IDF para la cuenca Rebolo, que se presentan en la *Figura 18*.

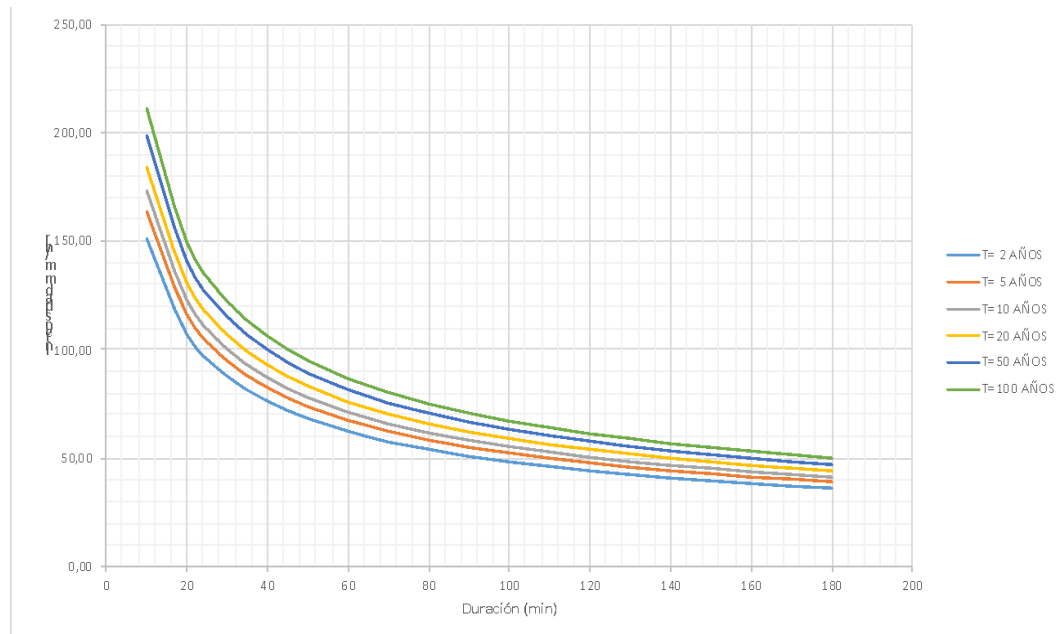


Figura 18 Curvas IDF con método de Mejía 2017 para cuenca Rebolo. Fuente: propia del autor.

Después de aplicar el modelo de Mejía. (2017). En la cuenca de Rebolo, los datos obtenidos y la curva IDF resultante con este método, se pasa a las simulaciones hidrológicas e hidráulicas para cada uno de los escenarios, que se muestran en el siguiente capítulo.

6. Simulaciones hidrológicas e hidráulicas

A continuacion, la simulación hidrológica e hidráulica en el arroyo Rebolo.

6.1. Simulación hidrológica

El proceso de diseño que se analiza contiene un modelo con diferentes parámetros, según escenarios, los cuales son simulados obteniendo el análisis hidrológico, en base a datos históricos recopilados y observados por las estaciones pluviométricas del Distrito. Es decir, las curvas IDF suministradas por el IDEAM.

El periodo de retorno, factores morfométricos, a la CN (curva numérica) seleccionada, la duración estimada de tormenta y factor de reducción; son usados para la producción de los bloques alternos o hietogramas para el periodo de retorno seleccionado, todos estos son tomados según El Plan Estrategico.

Según Álvarez, M. *et al* “el hietograma de una tormenta es la gráfica que representa la distribución de la lámina o intensidad de lluvia en el tiempo o duración de la tormenta.” (2000, p.131)). Por lo que el comportamiento general, se puede resumir en los siguientes aspectos:

- Hay variaciones considerables de unos episodios lluviosos a otros.
- Las variaciones en la distribución del tiempo son muy sensibles en comparación a la duración, el periodo de retorno y el tamaño de la tormenta.
- No hay diferencias entre resultados puntuales.

Todo esto conduce a que los hietogramas tienen una forma determinada que se modifica según la magnitud de la lluvia. En una tormenta real el hietograma es una transformación de una curva de masa, que es dividida en intervalos de tiempo. No obstante, se obtiene el hietograma de diseño a partir de las curvas IDF, definiendo un intervalo de tiempo para la variación de las

intensidades y una duración total para la tormenta. Para obtener un hietograma de una probabilidad o periodo de retorno de diseño, se debe definir el intervalo de tiempo con el fin de considerar las variaciones de las intensidades, el tiempo total de la tormenta y el periodo de retorno de diseño. Se desarrolla siguiendo los siguientes pasos.

- Primero se determina el número de intervalos N_i a definir, mediante la expresión:

Ecuación para números de intervalos de hietogramas. Fuente: Nelli, G. (2009).

$$N_i = \frac{D_i}{\Delta t}$$

Donde:

N_i = Número de intervalos.

D_i = Tiempo total de la tormenta.

Δt = Intervalo tiempo.

- En el segundo paso, para cada tiempo final de cada intervalo, la intensidad máxima en la curva IDF correspondiente al periodo de retorno de diseño; se calcula según la expresión correspondiente.
- En el tercer paso, se calcula la lámina total para intervalo L_t , por la expresión:

$$L_t = I_{max} * t(\text{tiempo en horas}).$$

- En el cuarto paso, se calcula la lámina de cada intervalo L_i , mediante la expresión:

$$L_i = L_{ti} - (L_{ti} - 1)$$

- En el quinto paso, se calcula la intensidad de cada intervalo I , por la expresión:

$$I = \frac{Li}{\Delta t} (\Delta t \text{ expresado en horas})$$

Debido a este proceso el hietograma tendrá una forma de pirámide, para lo cual se recomienda adecuar a la realidad el hietograma reorganizando estas intensidades, de forma que sigan patrones semejantes al comportamiento de la lluvia de la zona.

Entrando en materia para el diseño de un canal se realizan diferentes cálculos, dentro de los más importantes es la estimación del caudal de diseño, el cual es el resultado de un análisis hidrológico, con base a datos históricos en estaciones pluviométricas.

En este paso se realiza el análisis hidrológico con cada uno de los conjuntos de datos para obtener bloques alternos, es decir los valores de precipitación de cada evento, la tormenta es diseñada con una duración de 42 minutos, tal y como lo muestra el informe de diseño del Plan Estratégico.

A manera de ejemplo se muestra el proceso para el cálculo del hietograma adimensional o bloque alterno para un periodo de 10 años de retorno para una tormenta de 42 minutos con la curva IDF de la estación Las Flores.

Tabla 15

Características morfométricas de la cuenca Rebolo.

<u>MORFOMETRÍA DE LA CUENCA</u>			
ELEVACIÓN MÁX:	100,0 m	PENDIENTE:	0,52 %
ELEVACIÓN MÍN:	73,8 m	ÍNDICE DE GRAVELIUS (KC):	1,46
LONGITUD DE CAUCE:	5007,8 m	FACTOR DE FORMA DE FORMA (KF):	0,31
PERÍMETRO DE LA CUENCA:	14619,4 m	NUMERO DE CURVA CN	91,83
ÁREA :	7890000,0 m ²		

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 15 se muestra las características de la cuenca, estas son usadas para todos los escenarios.

Tabla 16

Tiempo de concentración de la cuenca Rebolo.

<u>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN</u>			
KIRPICH:	103,84 min	TÉMEZ:	69,24 min
		SCS - RANSER:	103,83 min
TC PROMEDIO	92,30 min	TC SELECCIONADO	92,30 min

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 16 los tiempos de concentración por diferentes metodologías. Se selecciona el tiempo promedio, esto se aplica de la misma forma para los diferentes escenarios.

Tabla 17

Tiempo de concentración y coeficientes de reducción.

<u>Tiempo de concentracion seleccionado, Lag time y coeficientes de reduccion.</u>					
TC SELECCIONADO:	92,30 min	C. Reduccion Frhuling	0,714	C. Reduccion USA	0,899
LAG-TIME:	55,38 min	C. Reduccion ICE	0,947	C. R. Seleccionado	0,714
		Periodo de Retorno	TR= 10 años		

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 17 se muestra el Lag Time, el periodo de retorno de diseño y el cálculo de coeficiente de reducción; este último se estima por varias metodologías. Se selecciona el de coeficiente de reducción de menor valor para usarlo en el modelo y la simulación.

Tabla 18

Pluviograma.

<u>PLUVIOGRAMA</u>								
ID Dato	DURACION (min)	I (mm/hr)	Precipitation Acumulada (mm)	Precipitation Incremental (mm)	i	Bloques Alternados (mm)	Bloques Alternados Corregidos (mm)	Curva de Masa (mm)
1	6	170,30	17,03	17,03	7	5,99	4,28	4,28
2	12	155,17	31,03	14,00	5	8,24	5,88	10,16
3	18	142,22	42,67	11,63	3	11,63	8,30	18,46
4	24	131,05	52,42	9,75	1	17,03	12,16	30,62
5	30	121,32	60,66	8,24	2	14,00	10,00	40,62
6	36	112,78	67,67	7,01	4	9,75	6,96	47,58
7	42	105,23	73,66	5,99	6	7,01	5,00	52,58

Fuente: propia del autor.

Para finalizar el proceso de cálculo del hietograma adimensional, se obtiene el pluviograma, donde los valores de precipitación en mm son corregidos al ser multiplicados por el

coeficiente de reducción, terminando en el valor de bloques alternos de diseño para cada intervalo de tiempo.

Este proceso se realiza para los diferentes escenarios obteniendo los bloques alternos o hietogramas de diseño. Los cuáles serán ingresados en HEC-HMS variando únicamente los datos de bloques alternos para cada uno de los escenarios a un periodo de retorno de diez (10) años.

Para la ilustración de cada escenario hidrológico de diseño se presentan a continuación en la

Figura 19

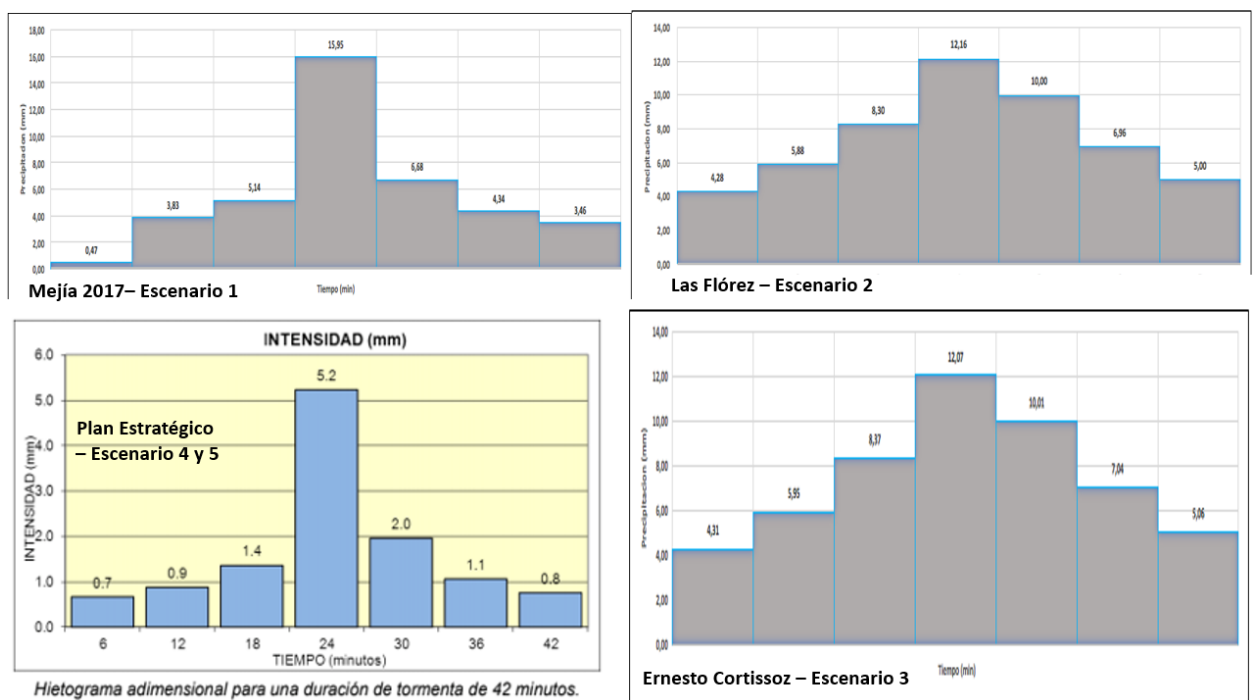


Figura 19 Hietogramas adimensionales de diseño. Fuente: propia del autor.

Con respecto a los valores morfométricos de la cuenca, serán igual para todos los escenarios y así observar qué tanto varían cada uno de los resultados, con los diferentes escenarios hidrológicos de diseño. Los parámetros fijos se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19

Parámetros fijos para simulación hidrológica.

Parametros fijos para la simulaciones	
Elevacion Max	100 m
Elevacion Min	73.8 m
Longitud de Cauce	5007.8 m
Perimetro de la cuenca	14619.4 m
Area	7890000.0 m2
Pendiente	0.52%
Indice de Gravelius (KC)	0.1
Factor de forma (KF)	0.31
Numero de curva CN	91

Fuente: propia del autor.

Con estos parámetros se realizan las simulaciones hidrológicas en HEC – HMS para la obtención de caudales de diseño para cada escenario. Lo cual se presenta a continuación.

6.1.1. Resultados de simulación con escenarios hidrológicos de diseño.

Para el análisis hidrológico se desarrolla cuatro simulaciones con cada escenario hidrológico de diseño. La primera con el hietograma adimensional resultante del modelo Mejía el cual es denominado, escenario 1. El segundo con el de las Flores, escenario 2. El tercero con el del Ernesto Cortissoz, escenario 3. Finalmente la cuarta con el hietograma tomado del informe del Plan Estratégico. Lo anterior, corresponde a los parámetros a variar en las simulaciones.

Los resultados de las simulaciones se presentan a continuación en las siguientes figuras

- Escenario 1 modelo Mejía (2017).

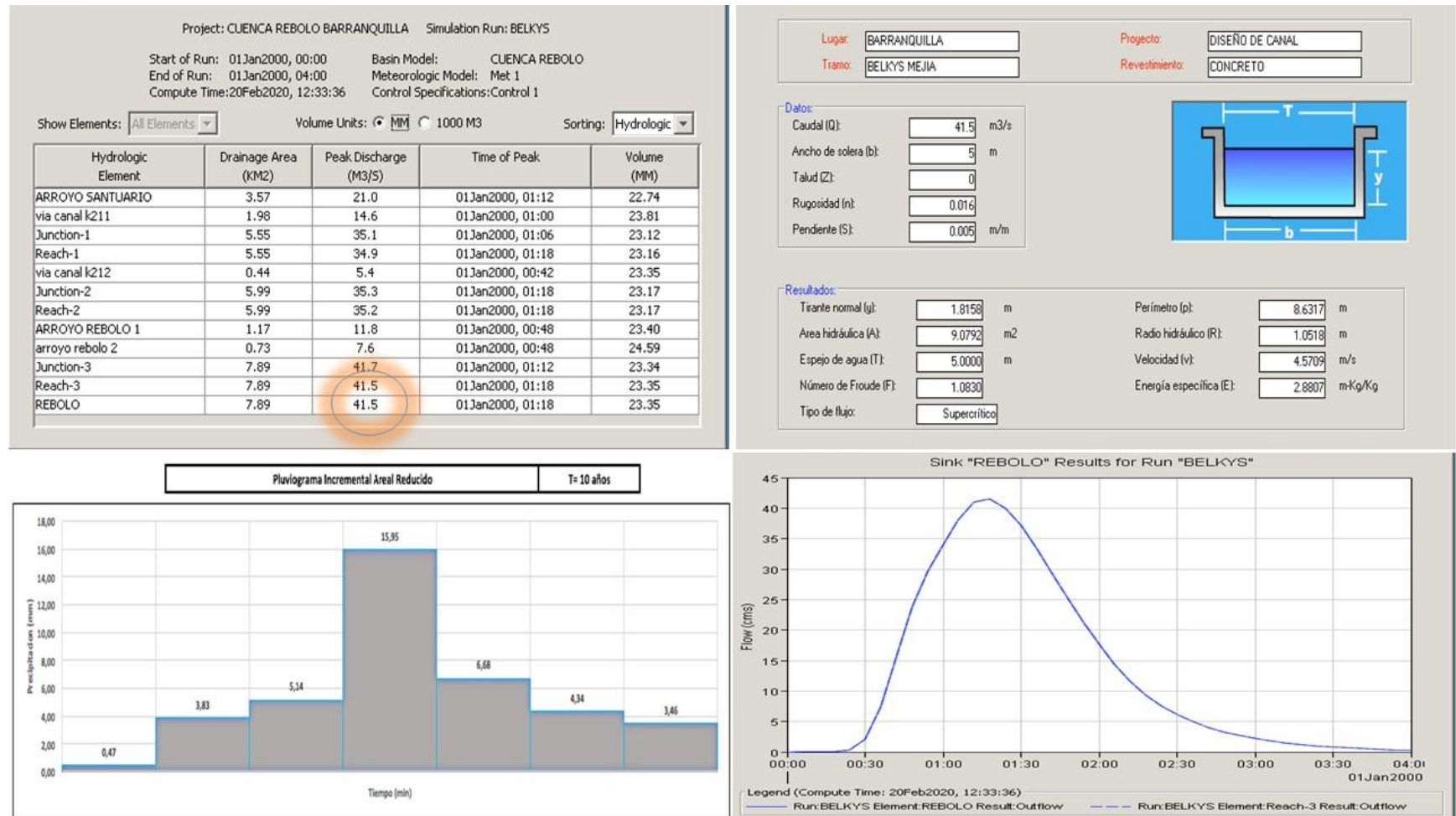


Figura 20 Resultados hidrológicos con estación pluviométrica según Mejía 2017. Fuente: propia del autor.

A partir de los resultados del análisis hidrológico que producen el bloque alterno que se muestra en la Figura 20. Es incluido en el programa HEC- HMS con el fin de estimar el caudal. Para este escenario se encuentra un caudal calculado de $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$ que es alcanzado a la hora con diez y ocho minutos de comenzar la tormenta.

Además, en el hidrograma de salida se ve claramente que la esorrentía desde su punto máximo, donde llega al caudal pico, que disminuye hasta desaparecer o hasta ser una pequeña cantidad de en la hora número cuatro.

Se observa un precipitación en los primeros seis minutos de 0.47 mm, un pico de 15.95 mm a los 24 minutos y 1.46 mm; Al cabo de los 42 minutos.

A continuación, se muestra los demás resultados de las simulaciones hidrológicas.

- Escenario 2 estación Las Flores.

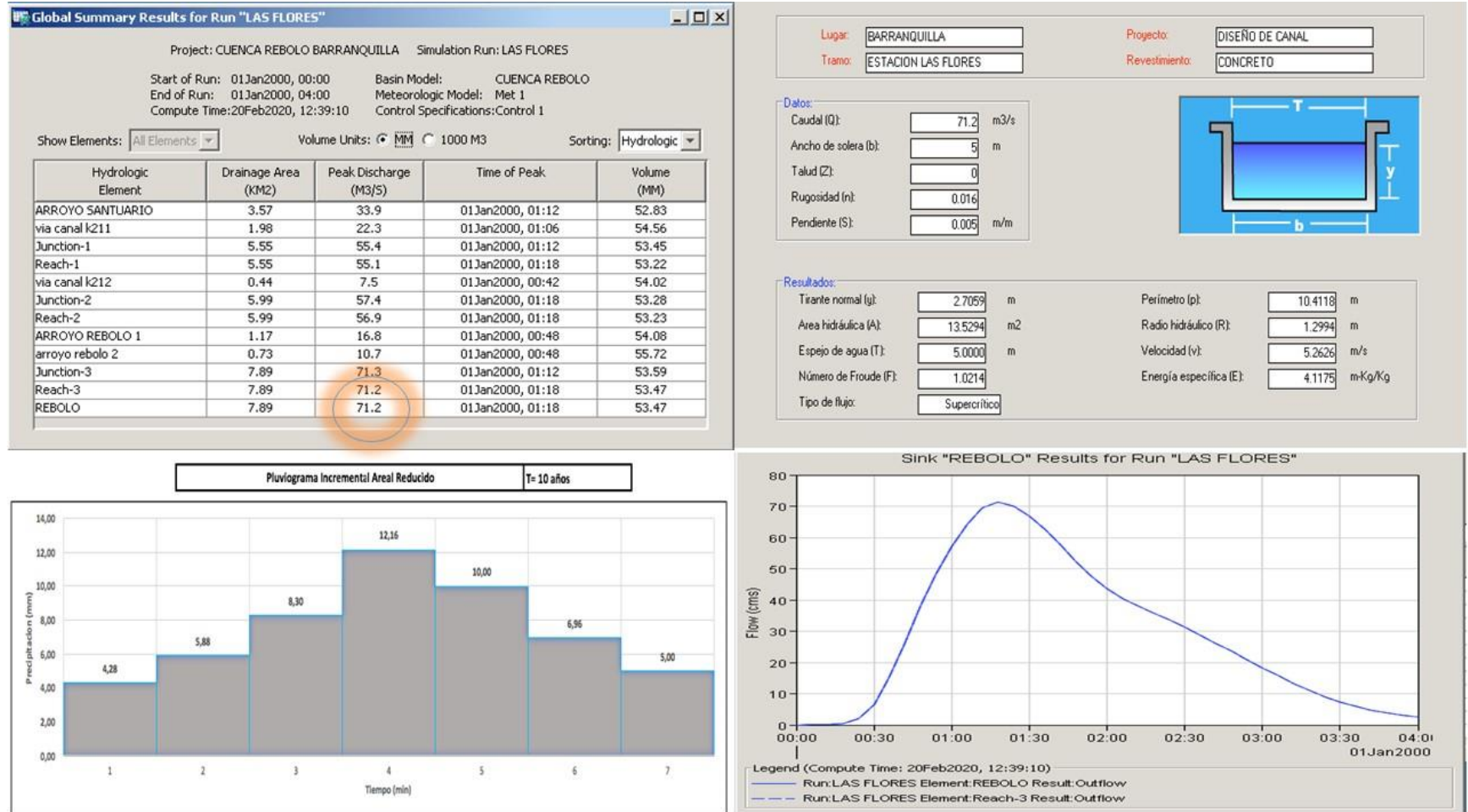


Figura 21 Resultados hidrológicos con estación pluviométrica Las Flores. Fuente: propia del autor.

Escenario 3 estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz

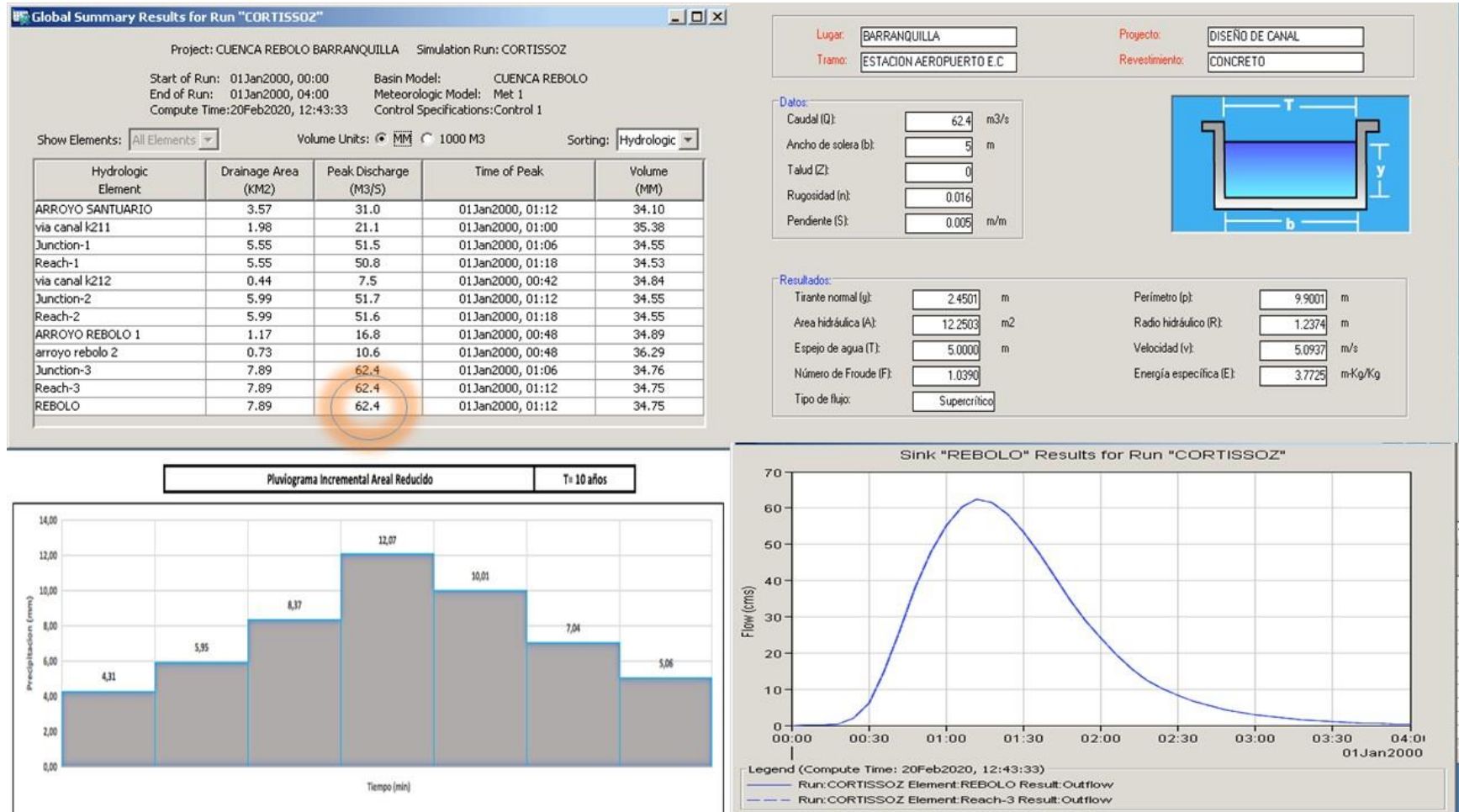


Figura 22 Resultados hidrológicos con estación del aeropuerto Ernesto Cortissoz. Fuente: propia del autor.

- Escenario 4 Réplica de resultados presentados en informe plan estratégico

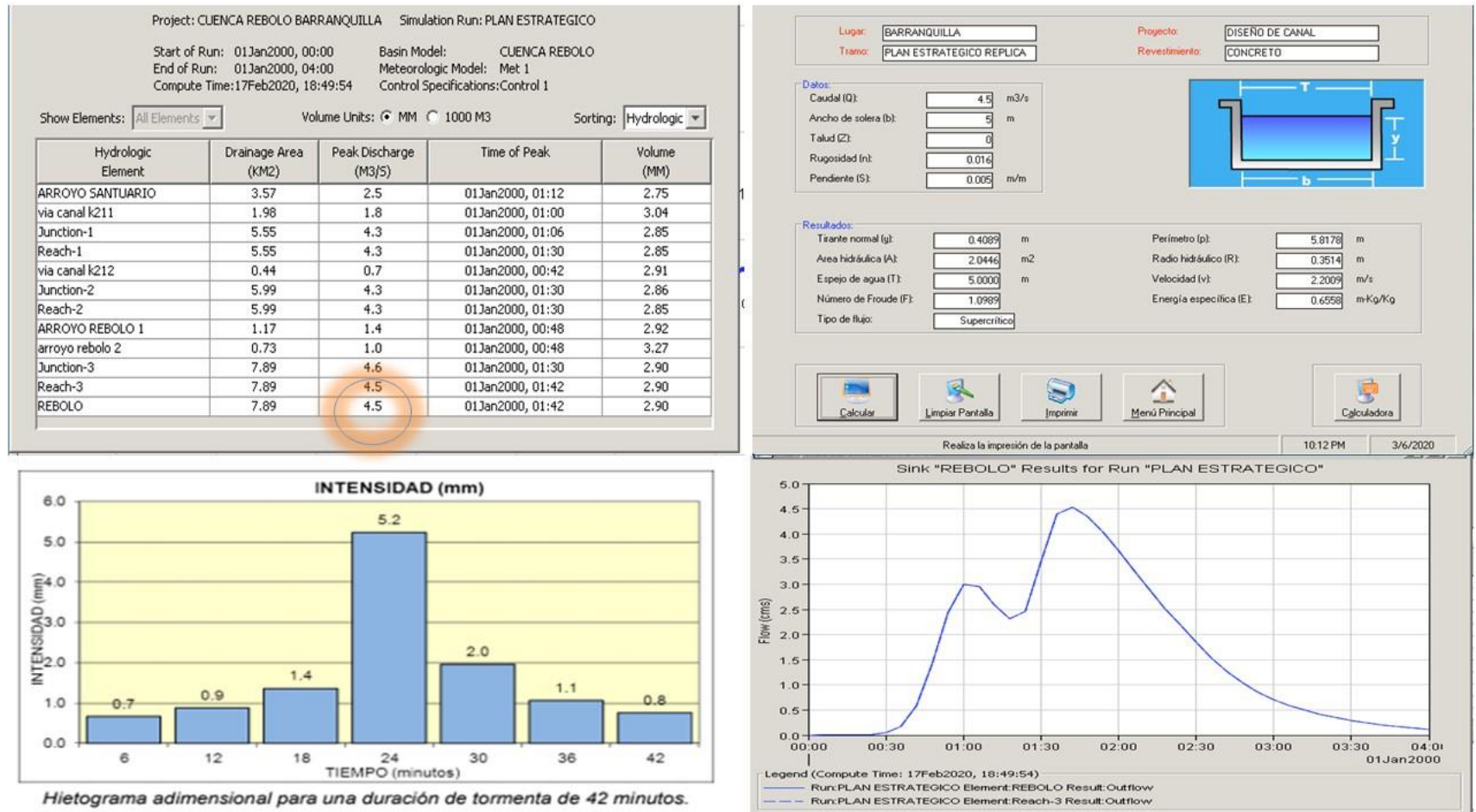


Figura 23 Resultados hidrológicos con bloque alternos del plan estratégico para la solución del drenaje urbano del Distrito de Barranquilla usados en HEC-HMS (Replica). Fuente: propia del autor.

- Escenario 5 resultados presentados en el informe del plan estratégico

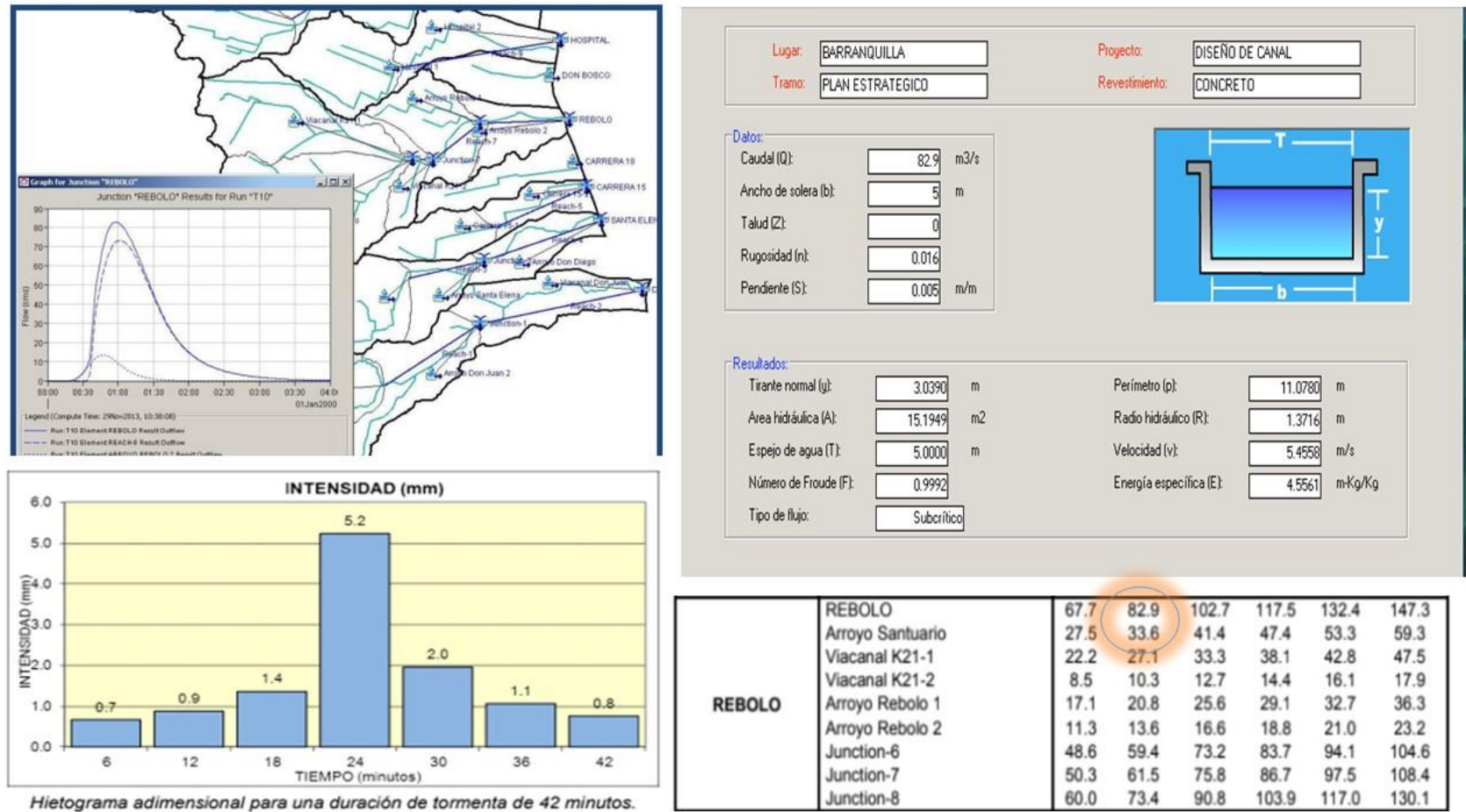


Figura 24 Resultados con caudal tomado de los resultados presentados en el plan estratégico para la solución de drenaje urbano del Distrito de Barranquilla.

Fuente: propia del autor.

Como resumen de los resultados previsto se muestra la siguiente tabla.

Tabla 20

Resumen de resultados de simulaciones hidrológicas.

Resultado de caudales por escenarios	
Escenario	Caudal m ³ /s
Modelo Mejia	41.5
Las Flores	71.2
Ernesto Cortisoz	62.4
Replica Plan Estrategico	4.5
Plan estrategico	82.9

Fuente: propia del autor.

Antes de finalizar este capítulo cabe resaltar que en La *Figura 23* los resultados del análisis hidrológico, presentados en el informe del Plan Estratégico, es decir el bloque alterno. Se incluye en el programa HEC- HMS con el fin de estimar el caudal y replicar los resultados del informe del plan estratégico. Para este escenario se encuentra un caudal calculado de 4,5 m³/s que es alcanzado a la hora con cuarenta y dos minutos de comenzar la tormenta.

Además, en el hidrograma de salida se ven dos picos de caudal, el primero es cerca a la hora de comenzar la tormenta, después de esto disminuye por media hora e inmediatamente comienza a subir hasta el caudal pico de 4,5 m³/s, siguiente a esto disminuye constantemente. No obstante, al cabo de los cuatros horas de observación aún se muestra una pequeña cantidad de escorrentía.

Con respecto al bloque alterno se ve un inicio de la tormenta con un valor de precipitación de 0,7 mm y un pico de 5,2 mm

No es posible replicar los resultados con los datos suministrados en el informe del plan estratégico.

Previstas las simulaciones hidrológicas se obtienen los cinco caudales de diseños para cada uno de los escenarios a comparar. Como paso siguiente, se incluye el caudal en el dimensionamiento previo y simulación hidráulica.

6.2 Simulación hidráulica

El diseño final de un canal se realiza con base a un caudal pico o de diseño que se calcula interactuando con diferentes parámetros. Que para esta investigación, serán fijos.

Para el cálculo Preliminar de dimensiones de un canal de sección rectangular, se usa el programa HCANALES. Ingresando en este el caudal resultante del análisis y simulación hidrológica, para cada uno de los escenarios sobre las mismas condiciones de diseño teniendo como resultado un tirante normal para cada escenario, que va a corresponder a la altura del canal más un borde libre que es recomendado según RAS (2000). De 0,4 m.

Después de conseguir las dimensiones del canal se simula en HEC-RAS, con el fin de observar cuál es su comportamiento hidráulico a lo largo de un tramo de 100 m.

En este proceso el diseño final de cada canal, al cual se le calcula el volumen interno o volumen de excavación para un metro de longitud para ser comparados entre escenarios y poder cuantificar la diferencia en el costo económico, el costo de excavación y retiro de material se estima en el mercado en aproximadamente \$25.000 COP por m³. Sispac. (2020).

Los resultados de este proceso son presentados a continuación para cada conjunto de datos o escenarios.

- Escenario 1 hidráulico escenario 1 (contraste), por el modelo de Mejía 2017.

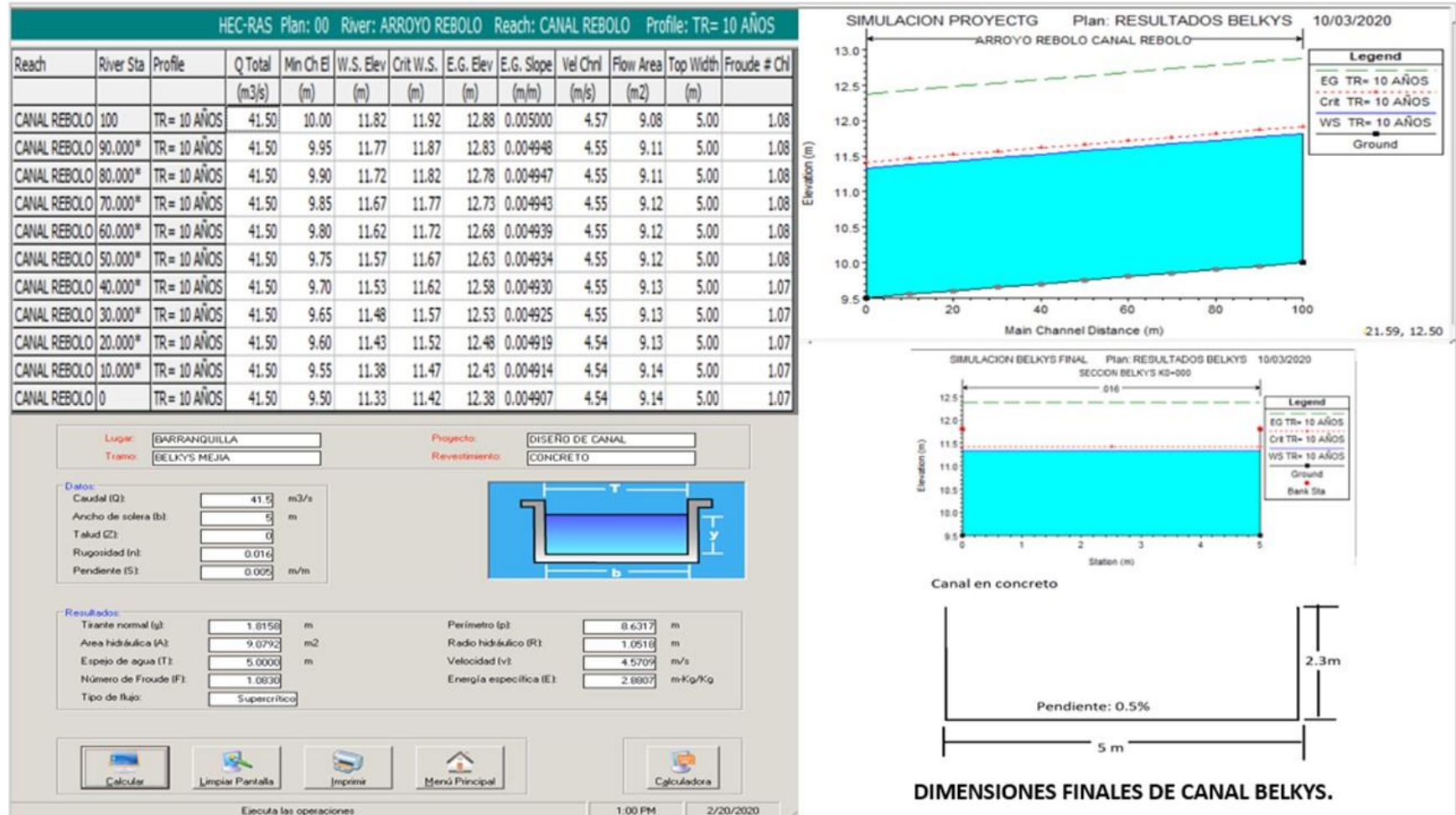


Figura 25 Resultados hidráulicos con modelo Mejía 2017. Fuente: propia del autor.

En la Figura 25. Los resultados del escenario 1 del tirante normal es de 1,81 m que al ingresarlo en HEC – RAS se le suma 0,4 m de borde libre dando como resultado un canal de concreto a una pendiente del 0,5%, rectangular de 5 m de ancho por 2,3m de altura o profundidad. Con un número de Froude que se mueve entre 1,07 y 1,080.

A continuación, se muestran los demás resultados de las simulaciones hidráulicas.

- Escenario 2 hidráulico estación Las Flores

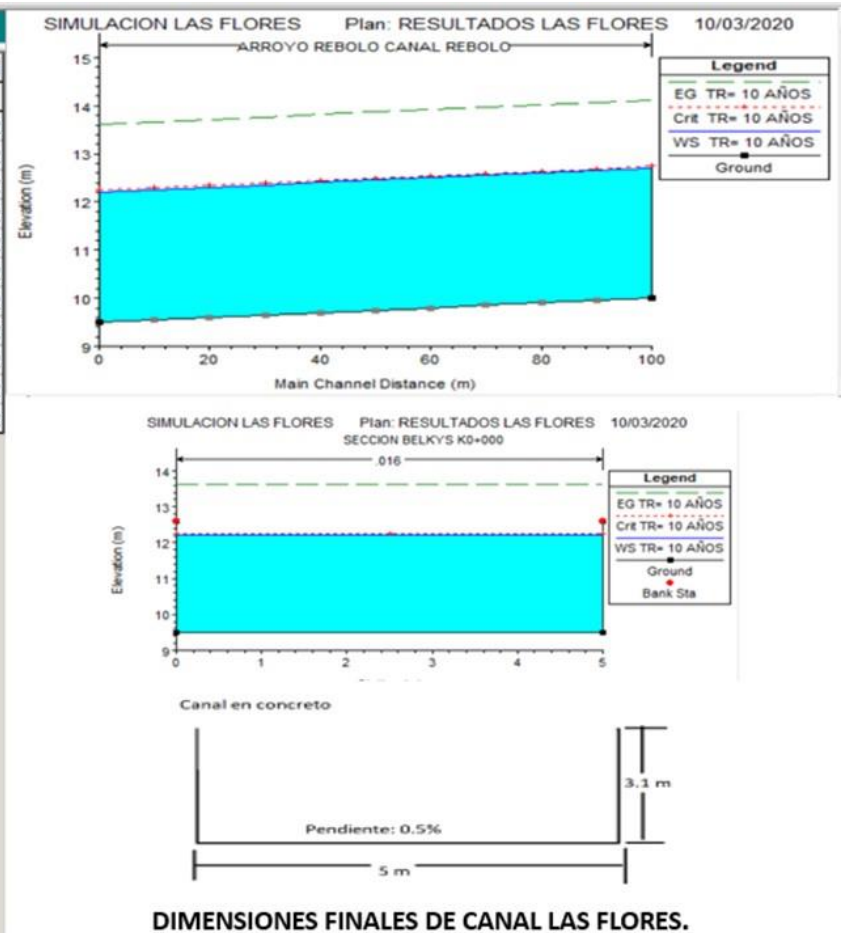
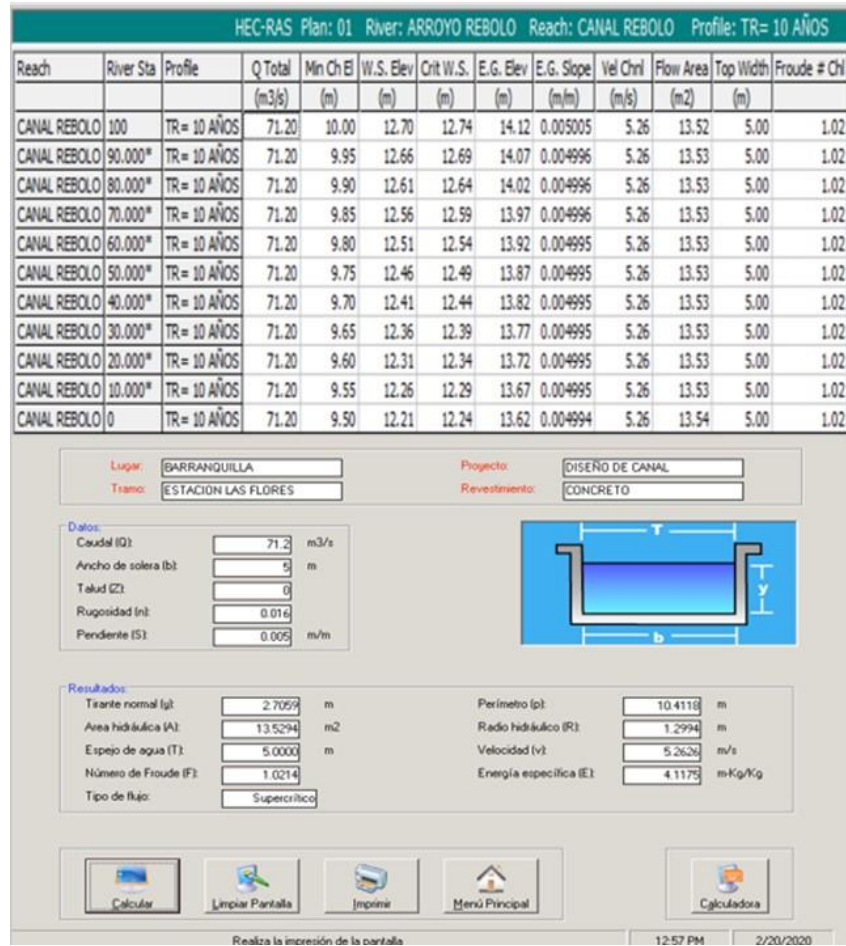


Figura 26 Resultados hidráulicos con estación Las Flores. Fuente: propia del autor.

- Escenario 3 estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz

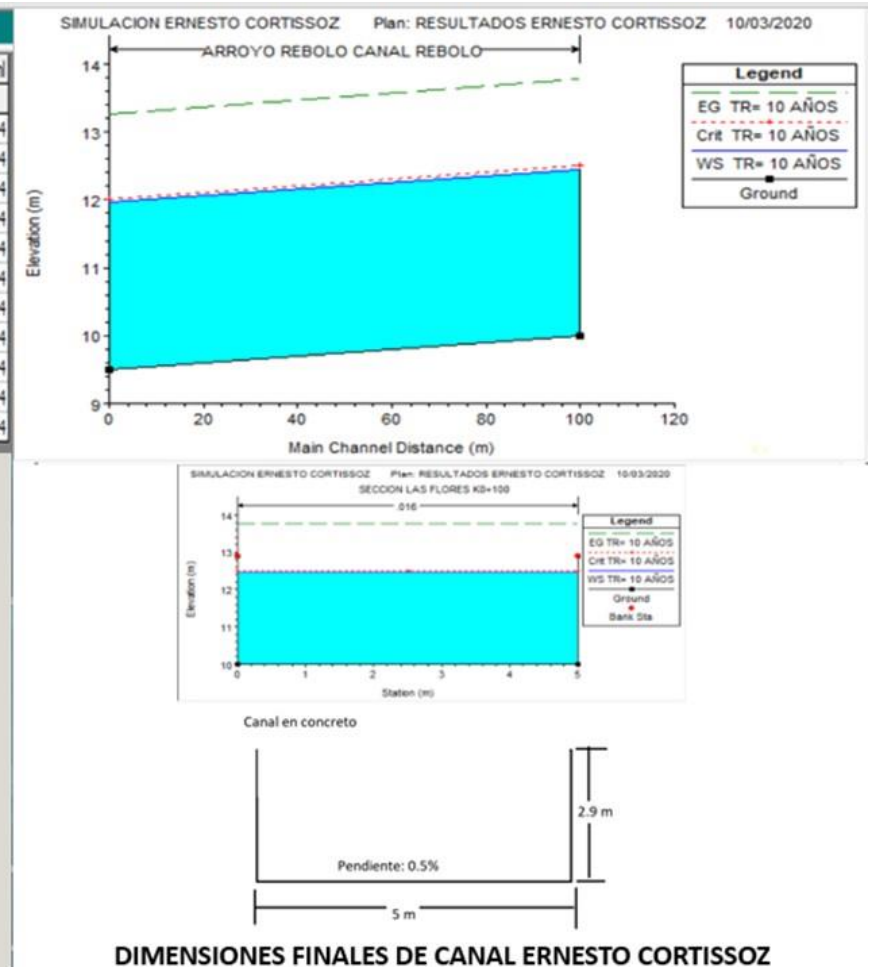
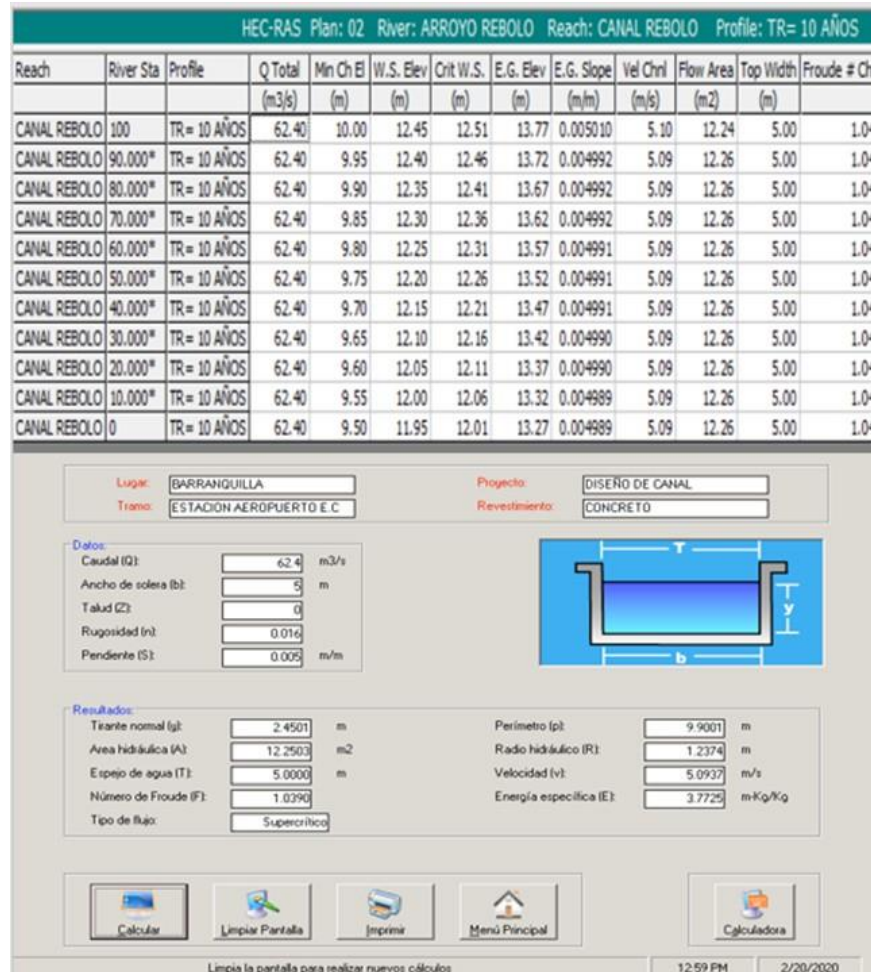


Figura 27 Resultados hidráulicos con estación Ernesto Cortissoz. Fuente: propia del autor.

- Escenario 4 replica presentados en el informe del plan estratégico

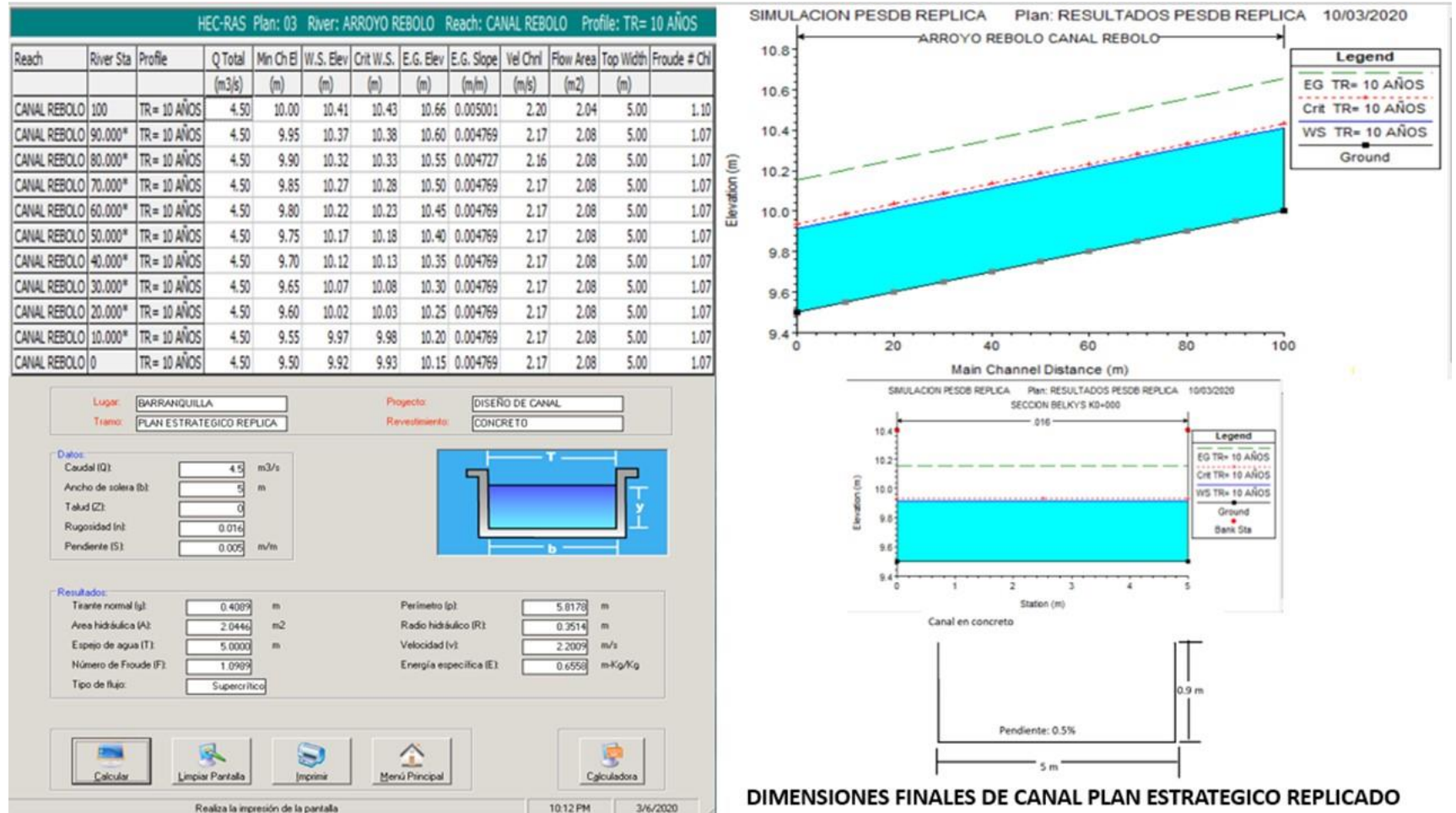


Figura 28 Resultados hidráulicos con intento de réplica de caudal del Plan Estratégico de drenaje de la ciudad de Barranquilla. Fuente: propia del autor.

- Escenario 5 del informe del plan estratégico

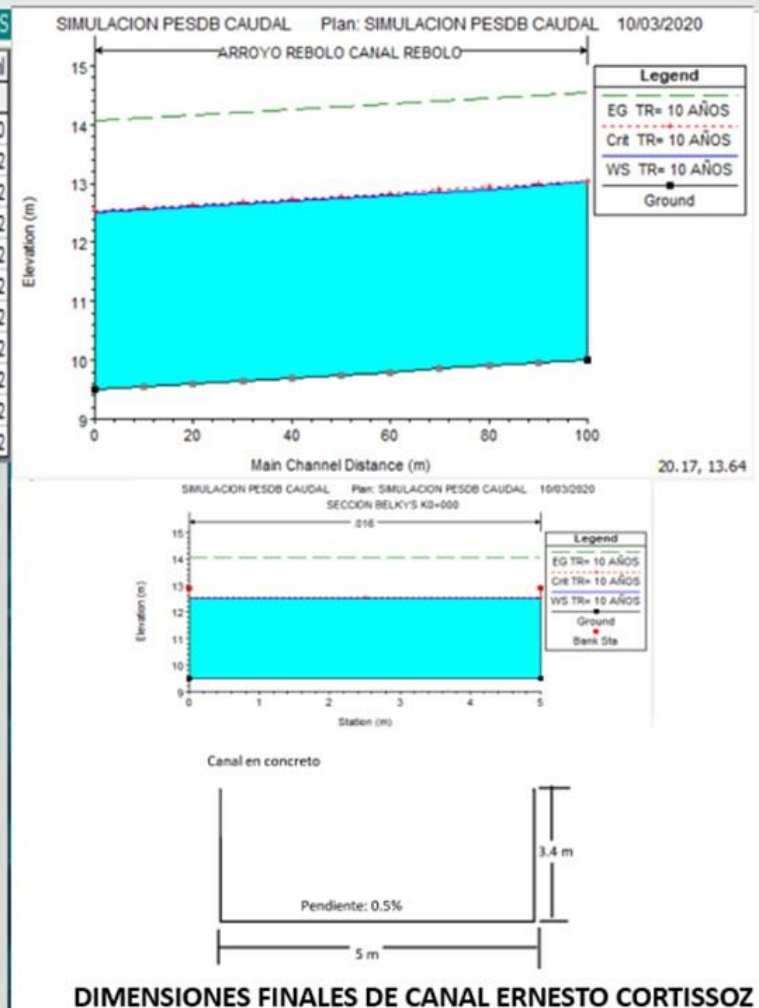
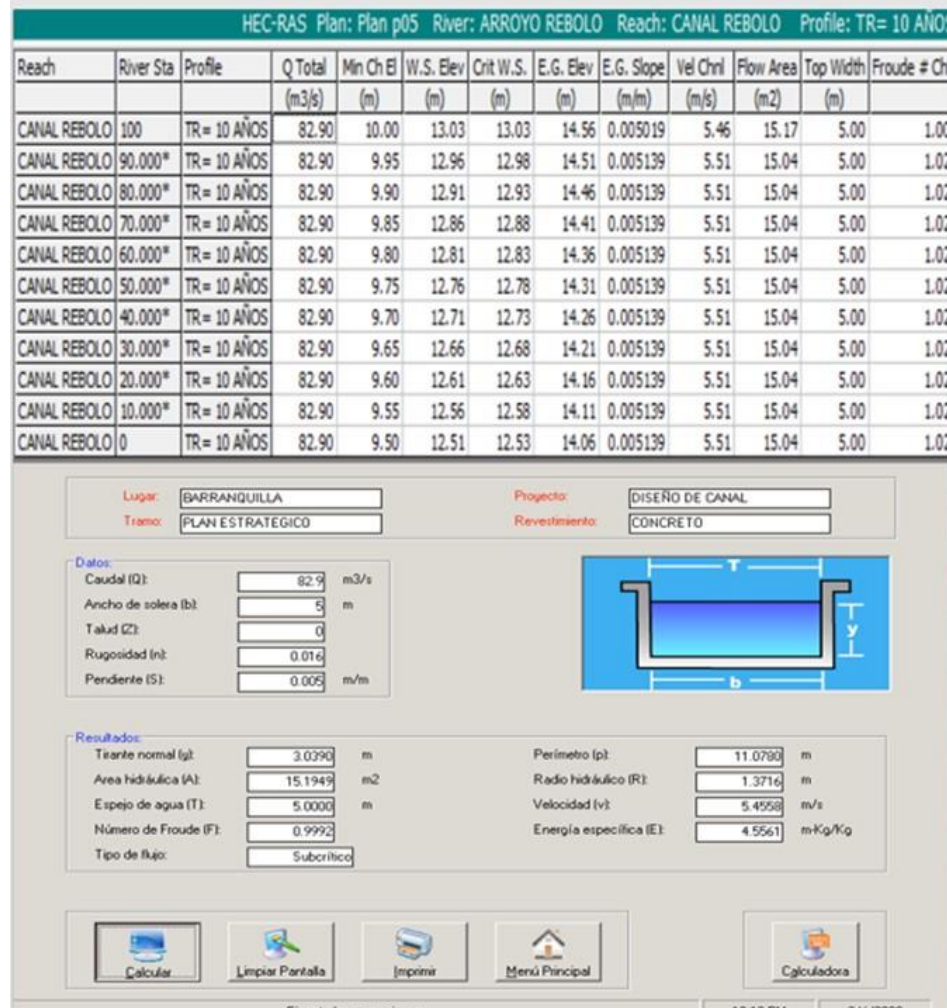


Figura 29 Resultados hidráulicos con caudal del plan estratégico de drenaje de la ciudad de Barranquilla. Fuente: propia del autor.

Tabla 21

Resumen de resultado de simulaciones hidráulicas.

Resultado de tirante normal por escenarios	
Escenario	Tirante normal (m)
Modelo Mejia	1.81
Las Flores	2.7
Ernesto Cortisoz	2.45
Replica Plan Estrategico	0.408
Plan estrategico	3.03

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 21 se observan los resultados de tirante normal después de realizar las simulaciones hidráulicas.

Con esto se finalizan las simulaciones y se tienen los resultados. En el siguiente paso se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

7. Análisis comparativo

Inicialmente se comparan los resultados de los parámetros sensibles de los diferentes escenarios a partir de una herramienta de estadística inferencial y análisis de datos. En la segunda, a través de un análisis de costos se analizan los efectos económicos de la variación en los diseños hidráulicos.

7.1. Análisis comparativo de parámetros sensibles

Se toma como herramienta estadística de análisis de datos los diagramas de caja. Los cuales dividen los datos por cuartiles, siendo los cuartiles de los extremos los más alejados de la media. Por ende, estos serían los datos rechazados y los que se encuentren dentro de los cuartiles medios los aceptados.

A continuación, se muestra el análisis comparativo.

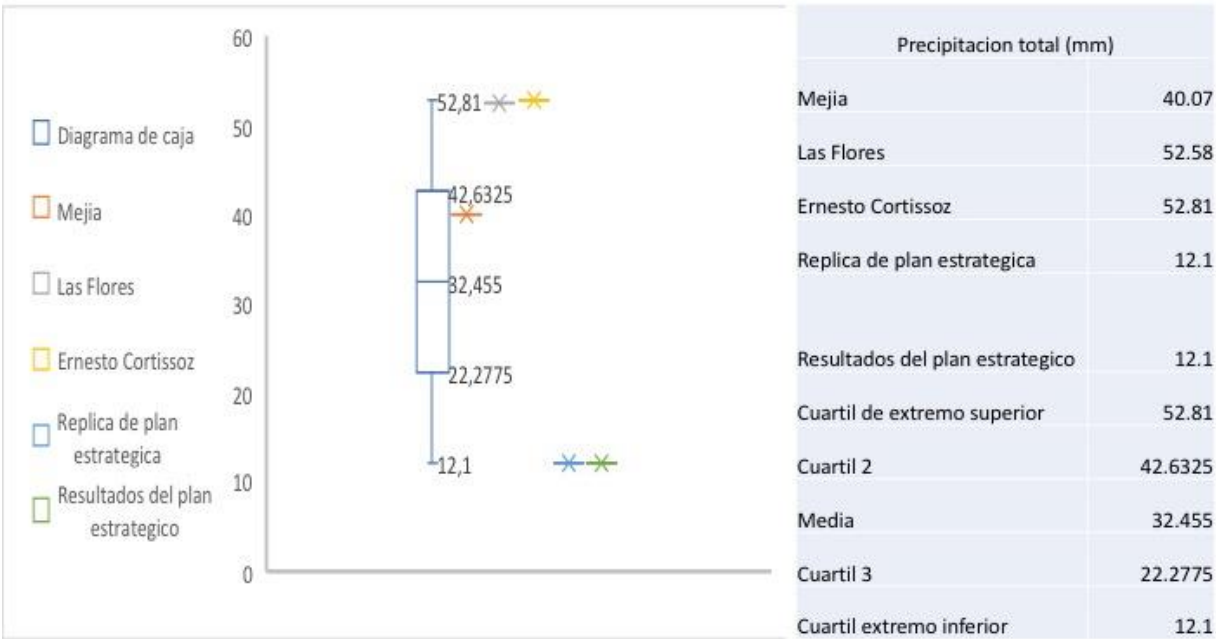


Figura 30 Diagrama de caja de precipitación total (mm). Fuente: propia del autor.

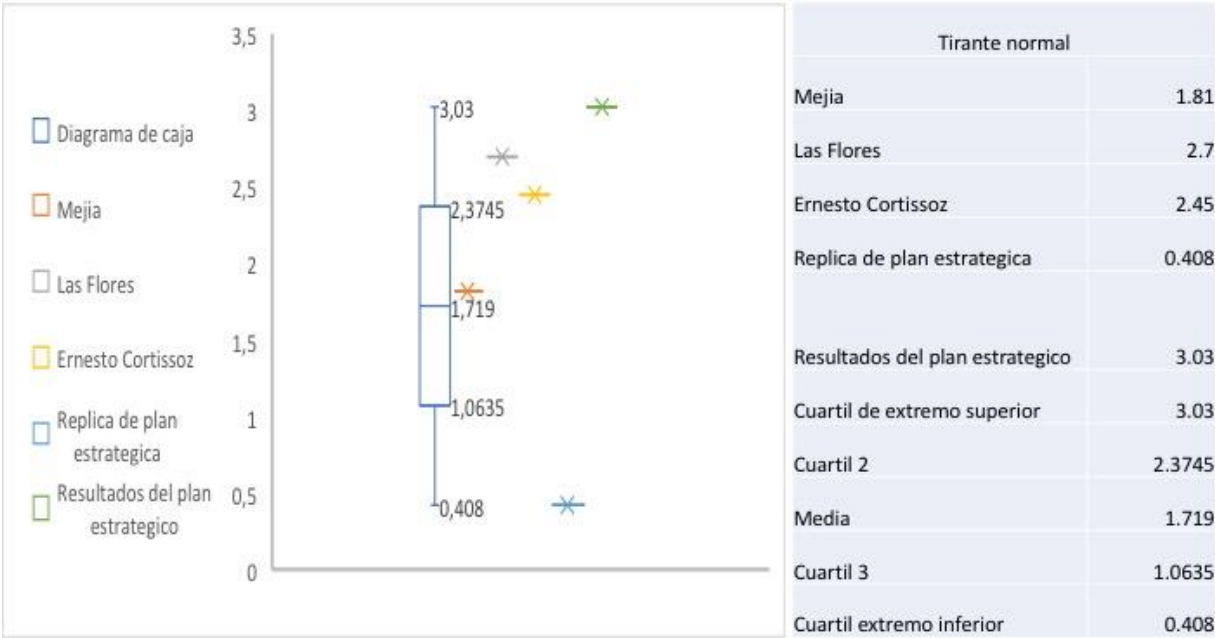


Figura 31 Diagrama de caja de tirante normal. Fuente: propia del autor.

En las *Figura 30* y *Figura 31* se observa como escenario más cercano a la media al escenario 1. Los escenarios 2, 3, 4 y 5 son rechazados por estar en los cuartiles extremos, los cuales tienen mayor dispersión y por ende, mayor incertidumbre.

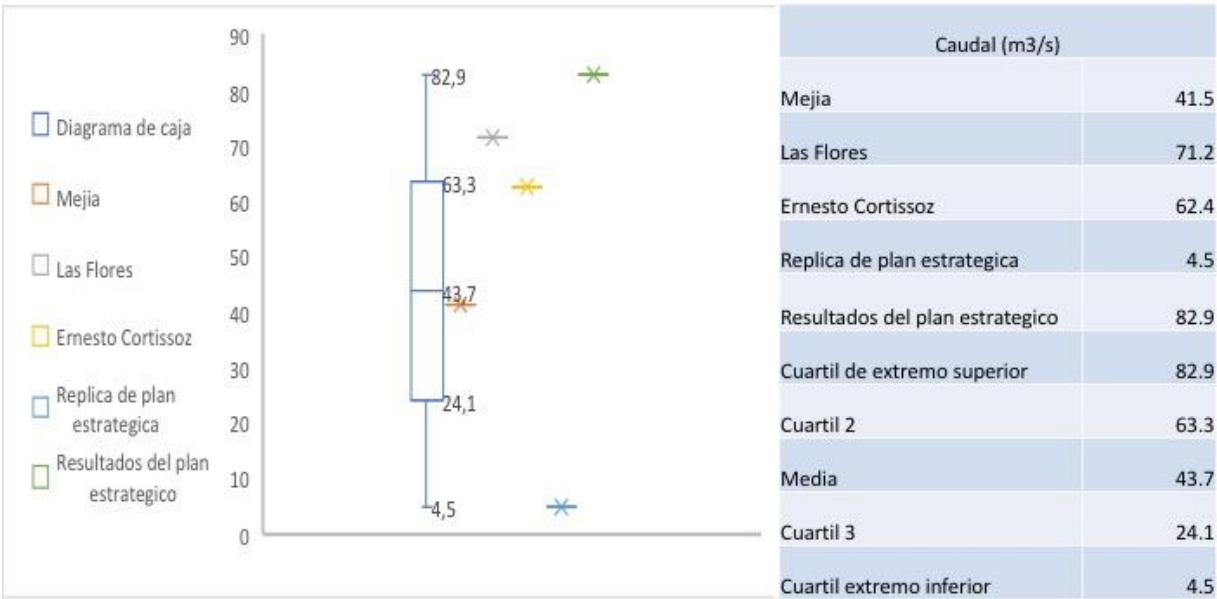


Figura 32 Diagrama de caja de caudal. Fuente: propia del autor.

La *Figura 32* se observa como los escenarios más cercanos a la media son el escenario 1 y el 3, los cuales son aceptados. Los escenarios 2, 4 y 5 son rechazados.

Se finaliza el recorrido por cada uno de los resultados hidrológicos e hidráulicos de los diferentes escenarios, realizando un análisis comparativo. Se observa variabilidad que genera incertidumbre, la cual es representada en efectos en las dimensiones del canal y en los costos de construcción

7.2. Efectos de la variabilidad en los costos

En este aparte se analizan los efectos de la variación en los costos de construcción de los diseños hidráulicos. Tomando como referencia y contraste el escenario 1, ya que es el escenario con mayor aceptación en el capítulo anterior, infiriendo que este es el más realista por su cercanía a la media. Estableciendo magnitudes y porcentajes de diferencia.

7.2.1. Escenario 1 vs Escenario 2

El escenario 2 es generado con base en la estación pluviométrica de Las Flores. Los resultados de caudal superan en 29,7 m³/s que es igual al 71,56% más con respecto al escenario 1. Es decir que el caudal del escenario 2 excede en 71,56% al del escenario 1 evidenciando variabilidad en el caudal.

También es importante considerar la variabilidad que se puede observar en los valores de precipitación total que son obtenidos de la suma de todos los valores presentados en los bloques alternos.

En este caso la suma del escenario 1 corresponde a 40,07 mm y al del escenario 2 a 52,58 mm, es decir supera a la precipitación total del escenario 1 por 12,51 mm que corresponde a un exceso del 31,22%

Los resultados del tirante normal superan en 0,89 m que es igual al 49,17% más con respecto al escenario 1. Es decir, que el canal del escenario 2 excede en 49,17% al del escenario 1 evidenciando variabilidad en sus dimensiones.

El volumen de excavación y retiro de material del sitio de forma manual según Sispac (2020) tiene un costo de \$25.000 COP por metro cúbico. Para el canal del escenario 1 es de 11,5 m³, esto tendría un costo de \$287.500 COP por metro lineal. Para el canal del escenario 1 es de

11,5 m³, esto tendría un costo de \$287.500 COP. Entonces, el canal del escenario 2 tiene un volumen de excavación por metro lineal de 15,5 m³, esto tendría un costo de \$387.500 COP.

Para una diferencia de \$100.000 COP, este valor representa una excedencia del 34,78% con base al valor del escenario 1, evidenciando variabilidad económica.

Tabla 22

Resumen de análisis comparativo y efectos de la variación en los costos.

Resumen de efecto de variacion en costos													
Escenarios	Δ caudal (m3/s)	%	Δ Precipitacion total (mm)	%	Δ Tirante normal (m)	%	Volumen de excavacion (m3) de E1	Volumen de excavacion (m3) de E2	Δ Volumen de excavacion (m3)	Costo por metro lineal E1 (COP)	Costo por metro lineal E1 (COP)	Δ costos por metro lineal (COP)	%
E1 VS E2	29.7	(+)71.56	12.51	(+)31.22	0.89	(+)49.17	11.5	15.5	4	\$ 287,500	\$ 387,500	\$ 100,000	35%
E1 VS E3	20.9	(+)50.36	12.74	(+)31.79	0.64	(+) 35.35	11.5	14.5	3	\$ 287,500	\$ 362,500	\$ 75,000	26%
E1 VS E4	-37	(-)89.15	-27.97	(-)69.81	-1.405	(-)77.46	11.5	4.5	-7	\$ 287,500	112500	-\$ 175,000	-61%
E1 VS E5	41.4	(+)99.75	-27.97	(-)69.82	1.22	(+) 67.40	11.5	17	5.5	\$ 287,500	425000	\$ 137,500	48%

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 22 se observa el análisis comparativo y efecto de la variación en los costos de los diseños hidráulicos de los diferentes escenarios de diseño hidrológico.

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 23 con un intervalo de confianza del 95% y el 5%.

Tabla 23

Resultados e intervalos de confianza.

Intervalo de confianza								
Escenario 1								
Caudal (m3/s)			Precipitacion total (mm)			Tirante normal (m)		
-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%
40.4625	41.5	42.5375	39.06825	40.07	41.07175	1.76475	1.81	1.85525
Escenario 2								
Caudal (m3/s)			Precipitacion total (mm)			Tirante normal (m)		
-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%
69.42	71.2	72.98	51.2655	52.58	53.8945	2.6325	2.7	2.7675
Escenario 3								
Caudal (m3/s)			Precipitacion total (mm)			Tirante normal (m)		
-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%
60.84	62.4	63.96	51.48975	52.81	54.13025	2.38875	2.45	2.51125
Escenario 4								
Caudal (m3/s)			Precipitacion total (mm)			Tirante normal (m)		
-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%
4.3875	4.5	4.6125	11.7975	12.1	12.4025	0.3978	0.408	0.4182
Escenario 5								
Caudal (m3/s)			Precipitacion total (mm)			Tirante normal (m)		
-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%	-2.50%	95%	2.50%
80.8275	82.9	84.9725	11.7975	12.1	12.4025	2.95425	3.03	3.10575

Fuente: propia del autor.

En la Tabla 23, se puede ver claramente los resultados según sus intervalos de confianza. No obstante, solo son aceptados el conjunto de datos del escenario 1. Ya que, se encuentran con menor distancia a la media. Por otro lado, se rechazan el 2, 3, 4 y el 5. No obstante, Cabe destacar que se observa que es el escenario 3 podría ser aceptado en segunda estancia por los resultados previstos en la comparación de los diagramas de caja de caudal y es por ser el que resulta con menor diferencia de costos entre los demás escenarios hidrológicos de diseño.

Conclusiones

Se analizó la variación de diseño hidráulico del alcantarillado pluvial de Barranquilla bajo diferentes escenarios hidrológicos de diseño, tomando como muestra el arroyo Rebolo.

En la investigación adelantada se encuentra variabilidad. En consecuencia, se genera incertidumbre en los diseños hidráulicos de alcantarillado pluvial del arroyo de Rebolo.

Los resultados permiten inferir la necesidad de establecer criterios optimizados adicionales a la distancia de la estación pluviométrica a la zona en estudio para elegir el escenario hidrológico de diseño. Adicionalmente, para la elección se recomienda establecer similitudes entre el sector en estudio y el área de influencia de la estación a elegir.

Se recomienda el uso del método de estimación IDF de Mejía (2017) como herramienta útil para el análisis hidrológico y diseño hidráulico de alcantarillado pluvial, por contar con un modelo que pondera las estaciones pluviométricas en el centroide de la cuenca y geolocaliza con base en los planos de isolíneas del modelo del Departamento del Atlántico. Se determina que puede ser usado en toda la zona metropolitana del Distrito de Barranquilla. Además, por ser una ponderación de todas las estaciones pluviométricas del Departamento del Atlántico, puede ser usado en cualquier parte de su territorio. Adicionalmente, el modelo Mejía tiene el potencial de aplicarse en el resto del país, con el fin de ponderar por departamento las estaciones.

La estación pluviométrica Ernesto Cortissoz es recomendable para realizar estudios hidrológicos en la zona de la cuenca de Rebolo, por encontrarse aceptada, ya que, se encuentra en los cuartiles centrales del análisis comparativo de caudales.

Al dar respuesta al interrogante de la investigación, se lograron los objetivos específicos del estudio al trabajar con el arroyo Rebolo.

En el proceso de las simulaciones se intentó replicar los resultados encontrados en el informe del Plan estratégico. Lo cual, no fue posible. El hietograma adimensional presentado en informe tiene una magnitud mucho menor con respecto a los otros escenarios hidrológicos de diseño. Lo anterior, se infiere como probable causa a este resultado.

Con respecto al análisis de costo, se encontró variabilidad en los diseños hidráulicos. Esta tuvo un efecto directo en ellos, debido a que cada canal tiene uno diferente lo cual implica una incertidumbre económica.

Sin embargo, pese a todos los resultados obtenidos, se aclara que no es posible con la información disponible, aplicar el método GLUE pues se requiere información medida para diferentes condiciones hidrológicas. Pero se recomienda establecer o priorizar las metodologías y herramientas para analizar la incertidumbre en los proyectos de alcantarillado pluvial.

Referencias

- Álvarez, M. J. Á., Parrales, E. L. P., Marcillo, L. A. P., Sánchez, L. A. G., García, C. E. P., Merino, G. L. M., ... & García, W. M. (2018). *Hidráulica aplicada para Ingenieros civiles* (Vol. 37). 3Ciencias. DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.37>.
- Blasone, Roberta-Serena (2008). *Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling*. *Advances in Water Resources* 31 (2008) 630–648.
- Beven, Keith; Binley, Andrew (1992). *The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction*. *Hydrological Processes*. 6 (3): 279–298.
doi:10.1002/hyp.3360060305. ISSN 0885-6087.
- Beven, Keith; Binley, Andrew (2014). *GLUE: 20 years on*. *Hydrological Processes*. 28 (24): 5897–5918. doi:10.1002/hyp.10082. ISSN 0885-6087.
- Diario del comercio (1925). *Archivo de la Familia Roca, Historia de Barranquilla*. Barranquilla, Colombia.
- Distrito de Barranquilla (2014) *Plan estratégico para la solución de drenaje urbano en el Distrito de Barranquilla*. Barranquilla, Colombia: Secretaria de Planeación.
- Instituto Nacional de Vías-INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías-INVIAS. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-ydocumentos/documentostecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file>
- JICA (1986) Misión Japonesa. Barranquilla: Agencia de Cooperación Internacional de la Misión Japonesa.

- Malabeth, Domingo (1946). *Fundación de Barranquilla*. En Vergara, José Ramón y Baena, Fernando, Barranquilla: Su pasado y su presente. 2da edición. Barranquilla, Colombia: Banco Dugand.
- Mejía, Belky (2017) *Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del Atlántico*. Barranquilla, Colombia: Universidad de la Costa. Facultad de Ingeniería. Tesis de grado.
- Ministerio de Vivienda (2000) *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico* (RAS 2000). Bogotá, D.C., Colombia.
- Nelli, G. C., Dasso, C., & Mascuka, E. (2009). *¿Existe un prototipo de hietograma sintético para diseño hidrológico? Cuadernos del CURIHAM*, 15, 1-12.
- Nott, David J.; Marshall, Lucy; Brown, Jason (2012). *Estimación de la incertidumbre de probabilidad generalizada (GLUE) y cálculo bayesiano aproximado: ¿Cuál es la conexión?* Investigación de recursos hídricos. 48 (12).
- Palacios, Julio H. (1992). *Historia de mi vida*. Barranquilla, Colombia:
- Peña Sánchez de Rivera, Daniel (2001). *Deducción de distribuciones: el método de Monte Carlo, en Fundamentos de Estadística*. Madrid: Alianza Editorial. ISBN 84-206-8696-4.
- Revista SIDA (1983). *Los Arroyos de Barranquilla*, Año VIII, No. 17, p 33-43 Barranquilla, Colombia.
- SISPAC (2019) *Revista Bimestral SISPAC* . Barranquilla, Colombia: Sistemas para Arquitectura y Construcción Limitada – SISPAC LTDA.
- Témez, J. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid. España: Dirección General de Carreteras.
- Vargas, M. R. y Díaz-Granados, D. M. (1998) *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Santafé de Bogotá: Universidad de los Andes.

Villalón Donoso, Jorge (2000). *Historia de Barranquilla*. Artículo Barranquilla 1920-1930:

Expansión Urbana, Ever González Chamorro, Ediciones UNINORTE. Barranquilla
Colombia.

weatherspark.com (2020) Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/23451/Clima-promedio-en-Barranquilla-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>)